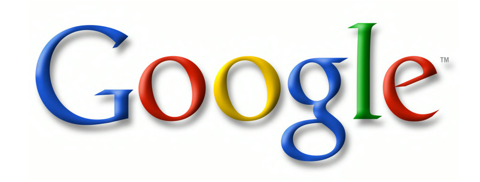
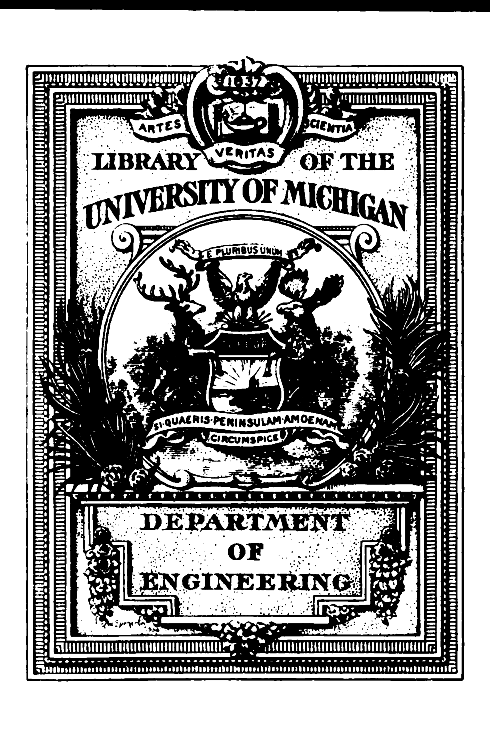



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING


LIBRARY
TJ
466
.S76

MANUEL

DE LA

MACHINE A VAPEUR

MANUEL

DE LA

MACHINE A VAPEUR

GUIDE PRATIQUE

DONNANT LA DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT
ET DES ORGANES

DES MACHINES ET DES CHAUDIÈRES A VAPEUR

A L'USAGE

Des Mécaniciens, Chauffeurs,
Dessinateurs et Propriétaires d'appareils à vapeur

PAR

ÉDOUARD SAUVAGE

PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES
ET AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

Avec 250 figures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
SUCCESSEUR DE BAUDRY ET Cie
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1905

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE IV

TRAVAIL DE LA VAPEUR DANS LES MOTEURS A PISTON

CHAPITRE V

DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

CHAPITRE VI

RÉGULARISATION ET TRANSMISSION DU MOUVEMENT

CHAPITRE VII

MOTEURS SANS PISTONS

CHAPITRE VIII

PRINCIPAUX ORGANES DES MACHINES

CHAPITRE IX

DISPOSITIONS D'ENSEMBLE DES MACHINES

CHAPITRE X

CONDENSATION

CHAPITRE XI

PRODUCTION DE LA VAPEUR

CHAPITRE XII

EMPLOI DES MACHINES

INTRODUCTION

1. Importance de la machine à vapeur. — Au commencement du XVIIIe siècle, on a construit des machines à vapeur pour épuiser l'eau des mines : en France, le premier moteur de ce genre a été installé, en 1732, à la mine de Fresnes, près de Vieux-Condé. Ces anciens appareils soulevaient la tige des pompes, qui descendait par son poids. Vers la fin du XVIIIe siècle, la machine à vapeur a été modifiée, et ces modifications, dues en partie à James Watt, en ont beaucoup étendu l'emploi : le mouvement en ligne droite du piston a été transformé en mouvement tournant d'un arbre : la détente de la vapeur dans le cylindre moteur, l'emploi du condenseur séparé, l'élévation de la pression dans la chaudière, ont augmenté la puissance des moteurs, tout en réduisant la consommation de combustible. Dans le cours du XIXe siècle, les applications de la machine à vapeur se sont beaucoup étendues : pour les transports, on estime qu'il existait en 1900 environ 140 000 locomotives; le nombre des bateaux à vapeur va sans cesse en croissant; les moteurs fixes se multiplient dans les établissements industriels et aussi pour les services publics des villes, tels que distributions d'eau, éclairage électrique, traction sur les tramways.

La statistique du ministère des travaux publics donne, pour la France et l'Algérie, 113 517 chaudières et 101 791 machines à vapeur en activité pendant l'année 1902. Dans ces nombres se trouvent comptées 13 065 locomotives en ser-

vice sur les chemins de fer et les tramways, mais ils ne comprennent pas les appareils de la marine militaire.

Les machines à vapeur transforment en travail moteur une partie de la chaleur dégagée par les combustibles qui brûlent. Les moteurs à gaz, à pétrole, produisent aussi du travail à l'aide de la chaleur, mais sans l'intermédiaire de la vapeur d'eau. Tous ces appareils, où la chaleur est l'origine du travail moteur, sont dits *moteurs thermiques*.

On utilise aussi le vent, qui a rendu et qui rend encore de grands services aux navigateurs, les chutes d'eau, la force de l'homme, la force des animaux, employés en nombre immense pour la traction des voitures, pour le labourage et les autres façons de la terre.

Parmi tous les moteurs mécaniques, la machine à vapeur, par la variété et l'importance de ses applications, tient actuellement la première place, et l'étude en est utile ou intéressante pour un grand nombre de personnes. Le présent manuel est, en partie, un abrégé d'un traité général de la machine à vapeur, du même auteur, publié en 1896; les développements abstraits en ont été simplifiés et, d'autre part, certains détails sur la construction et sur la conduite des machines ont été ajoutés.

2. Unités et mesures. — Pour désigner les unités métriques, on doit faire usage des abréviations établies par le comité international des poids et mesures. Le tableau qui suit donne ces abréviations pour les unités employées dans l'étude des machines :

MESURES DE LONGUEUR		MESURES DE SUPERFICIE	
Mètre	m	Mètre carré	m^2
Décimètre	dm	Décimètre carré	dm^2
Centimètre.	cm	Centimètre carré. . . .	cm^2
Millimètre	mm	Millimètre carré	mm^2
Micron ($0^{mm},001$)	μ		

MESURES DE VOLUME		MESURES DE POIDS	
Mètre cube	m^3	Tonne.	t
Décimètre cube	dm^3	Quintal métrique. . . .	q
Centimètre cube	cm^3	Kilogramme.	kg
Millimètre cube	mm^3	Gramme.	g
		Décigramme.	dg
		Centigramme	cg
		Milligramme.	mg

Le litre (*l*) est un autre nom du dm^3; plus rigoureusement le comité international des poids et mesures a récemment décidé que le litre était exactement le volume d'un kg d'eau dans certaines conditions définies, volume qui peut différer du dm^3 d'une très petite quantité, inappréciable dans les applications pratiques.

En effet la masse du kilogramme n'est qu'à peu près celle d'un dm^3 d'eau; en toute rigueur le kilogramme est la masse de l'étalon prototype, déposé au pavillon de Breteuil, à Sèvres. De même, le mètre n'est qu'à peu près la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

Le poids d'un corps varie légèrement suivant l'endroit de la terre où il est placé, mais, dans les usages courants, cette variation du poids n'est guère appréciable. A Paris, un poids d'un kilogramme se trouve diminué d'un milligramme, quand on le place à une hauteur de 3,60 m au-dessus de sa position primitive. Il faut bien remarquer que les balances ordinaires les plus sensibles ne peuvent mettre en évidence cette variation du poids avec l'altitude, parce qu'elles ne font que comparer des poids, sans en donner la valeur absolue. Le corps à peser et les poids de la balance subissent la même variation quand l'altitude varie. La *masse* reste invariable, quelle que soit l'intensité de la pesanteur.

La combinaison des symboles kg et m donne l'abréviation kgm qui représente le *kilogrammètre*, unité de travail (§ 12). Il est bien important d'éviter la confusion des symboles kgm

et kg et l'attention du lecteur est spécialement appelée sur ce point.

Quand on indique une mesure, souvent le nombre à écrire est fractionnaire ; alors il est commode de mettre l'abréviation, qui désigne l'unité, après la dernière décimale. Ainsi 135,7 m^3 veut dire 135 mètres cubes plus 7 dixièmes de mètre cube ; 0,6 g signifie 6 dixièmes de gramme.

Parmi les grandeurs géométriques envisagées dans les machines, les *angles* sont d'un emploi fréquent. Un angle est mesuré par la longueur de l'arc que ses côtés interceptent sur une circonférence dont le centre est au sommet. L'unité d'angle, ou *radian*, correspond à l'arc de longueur égale au rayon. On a conservé l'ancienne division de la circonférence en 360 *degrés* (360°) subdivisés en 60 *minutes* (60′) contenant chacune 60 *secondes* (60″), division dont le seul mérite est d'être universellement usitée. 180 degrés valent approximativement un radian multiplié par 3,1416. Inversement, un radian contient à peu près 57° 17′45″.

La lettre grecque π désigne le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre, rapport égal approximativement à 3,1416. La circonférence d'un cercle de rayon R est égale à $2\pi R$, soit, pour un rayon de 2 m, à 4π ou 12,2664 m.

MANUEL

DE LA

MACHINE A VAPEUR

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE[1]

3. Savery et Newcomen. — La découverte du poids de l'atmosphère, et de la pression qui en résulte, remonte à la première moitié du XVIIe siècle; elle est due à Galilée. Son disciple Torricelli mesura cette pression à l'aide du baromètre. Pascal effectua cette mesure en deux points d'altitudes différentes, dans l'expérience qu'il fit exécuter au Puy de Dôme, et qu'il répéta à Paris, à la tour Saint-Jacques. L'idée de faire agir cette pression sur un piston, semblable à ceux qu'on employait depuis longtemps dans les pompes, est assez naturelle; mais pour cela, il fallait trouver le moyen de faire disparaître la pression sur l'une des faces du piston. Papin y réussit, en chassant l'air par la vapeur d'eau, puis en condensant la vapeur. La première application pratique paraît être celle de Savery, qui fit agir la vapeur directement sur l'eau contenue dans un récipient clos; la vapeur refoulait l'eau, et l'aspiration dans le récipient résultait de sa condensation ultérieure. C'est le principe du pulsomètre actuellement en usage. La première machine à piston qui se soit répandue dans l'industrie est celle des ouvriers Newcomen et Cawley, qui l'appliquèrent à

[1] Ce chapitre donne seulement quelques indications relatives à des dispositions essentielles.

l'épuisement de l'eau des mines. C'était aussi l'un des usages de la machine de Savery, mais une hauteur de refoulement un peu grande exigeait une pression dangereuse pour les chaudières qu'on pouvait construire à cette époque.

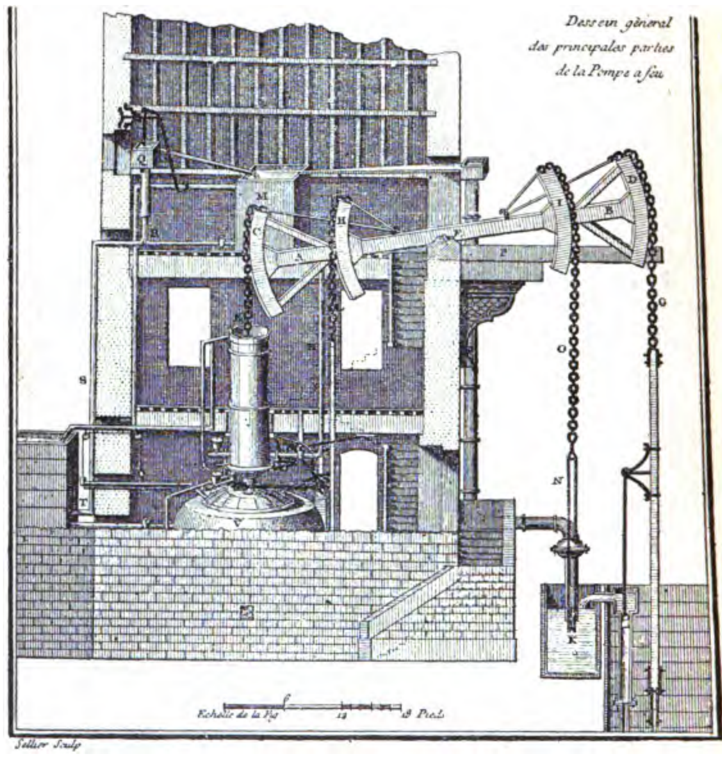


Fig. 1. — Moteur installé en 1732 pour l'épuisement de la mine de Fresnes, d'après l'*Architecture hydraulique* de Bélidor, publiée en 1739.

L'action motrice de la machine de Newcomen consistait à soulever une tige installée dans le puits de mine, dite *maîtresse tige :* le poids de cette tige, pendant sa descente, mettait en mouvement des pompes foulantes. Les figures 1 et 2 repré-

sentent la machine de la mine de Fresnes. On voit que la maîtresse tige est attachée à l'extrémité d'un balancier, dont l'autre extrémité est reliée à un piston, se mouvant dans un cylindre.

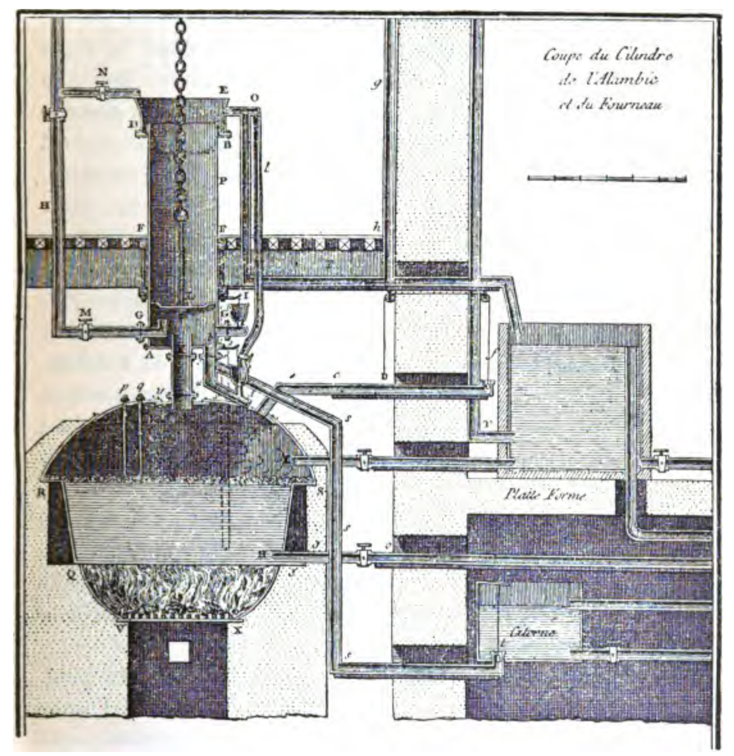


Fig. 2. — Moteur pour l'épuisement de la mine de Fresnes, d'après Bélidor.

La description du fonctionnement de cette machine que donne Bélidor, dans son « Architecture hydraulique », est fort claire.

« L'eau qui bout dans l'alambic produit une *vapeur*, qui passe dans le cylindre, dont elle remplit la capacité à mesure

que le piston s'élève par le contrepoids du balancier. Dès que le piston est parvenu à son plus haut terme, l'effet d'un certain mouvement interrompt, par le moyen d'un diaphragme nommé *régulateur*, la communication de la chaudière et du cylindre, dans lequel il survient subitement une *injection* d'eau froide, qui, venant jaillir contre le dessous du piston, retombe en pluie, et condense la vapeur, dont la force s'anéantit; ce qui fait naître un *vuide* qui donne lieu à la *colonne d'air* de chasser le piston de haut en bas pour le ramener d'où il était parti. Aussitôt le mouvement dont nous venons de faire mention, agissant d'un sens contraire, ferme le *robinet d'injection*, et ouvre le régulateur, pour laisser à la vapeur la liberté de s'introduire de nouveau dans le cylindre, et recommencer la même manœuvre. Ainsi *l'on voit que le jeu de cette machine dépend de l'effet alternatif de l'eau chaude et de l'eau froide, joint à l'action de l'atmosphère.* »

La pression de la vapeur était égale à celle de l'atmosphère, et la condensation se faisait dans le cylindre même par injection d'eau ; à la fin de la course descendante du piston, la machine expulsait hors du cylindre l'eau de condensation.

Cette injection d'eau dans le cylindre même était déjà un progrès pratique : on avait commencé par condenser la vapeur en refroidissant l'extérieur du cylindre, et la marche de l'appareil était fort lente, tandis que la machine décrite par Bélidor donnait quinze coups par minute.

Pendant la course effectivement motrice, c'est la pression de l'atmosphère qui fait descendre le piston : mais l'atmosphère joue seulement le rôle d'un *contrepoids*, que la vapeur soulève pendant la course montante; pendant la descente, ce contrepoids restitue le travail qu'il a reçu. Ainsi la pression atmosphérique, que les premiers auteurs de la machine à vapeur semblent avoir voulu utiliser, ne joue réellement qu'un rôle secondaire et n'accomplit aucun travail dans une évolution complète de l'appareil.

4. Watt. — La machine de Newcomen se multiplia dans les mines sans grande modification. L'envoi de l'eau froide dans le cylindre, pour condenser la vapeur, en refroidissait beaucoup les parois, et augmentait ainsi la dépense de vapeur, qui devait ensuite réchauffer ces parois à chaque course motrice du piston. Watt imagina le *condenseur séparé*, où se mélangent l'eau froide et la vapeur s'échappant du cylindre, disposition qui atténue, mais sans la supprimer complètement, l'action nuisible des parois alternativement chauffées et refroidies. Viennent ensuite l'*enveloppe de vapeur*, qui entoure le cylindre; le *double effet*, ou l'action de la vapeur sur les deux faces du piston dans un cylindre entièrement clos, d'où la tige sort à travers une *garniture* à étoupes; l'emploi de la

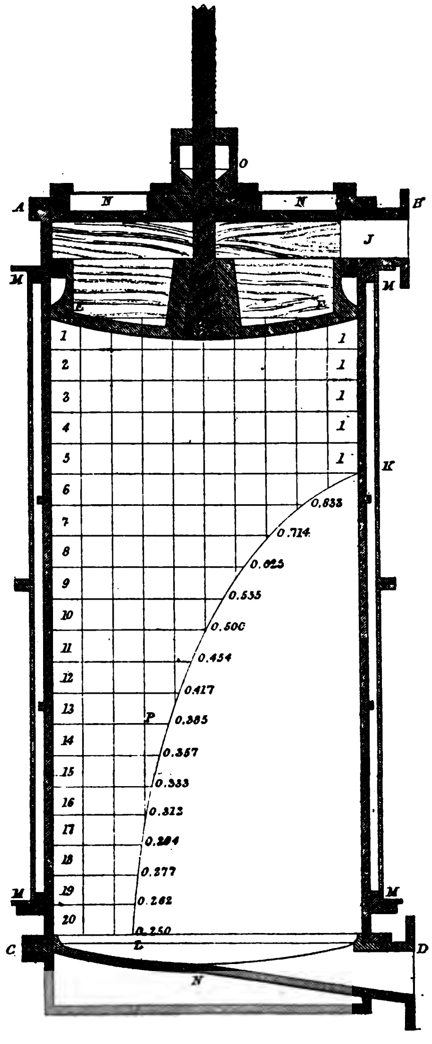


Fig. 3. — Diagramme du travail de la vapeur, pendant l'admission et pendant la détente (d'après Watt).

détente, qui augmente le travail donné par la vapeur; enfin la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement de rotation continu; alors la machine à vapeur n'est plus limitée à la commande des pompes. Tous ces progrès étaient réalisés en 1781. Plus tard, on éleva la pression de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique. Watt a donné un diagramme très clair qui représente l'action de la vapeur travaillant avec détente (fig. 3), au moyen de longueurs rapportées aux divers points

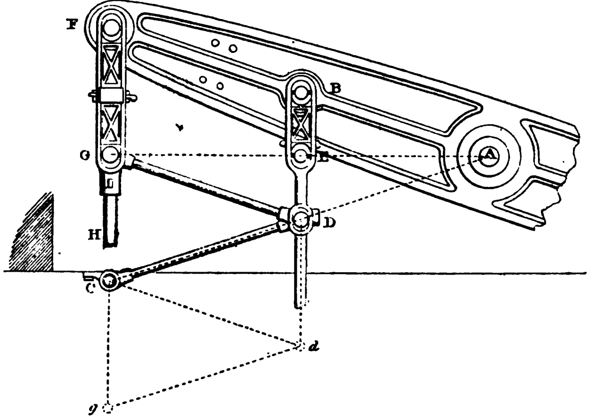


Fig. 4. — Parallélogramme de Watt; le sommet G du parallélogramme articulé FBDG, dont le sommet D est relié au centre fixe C, décrit une courbe très voisine d'une droite. La trajectoire du point E, sur le côté BD, est également à peu près rectiligne.

de la course : la force avec laquelle le piston est poussé de haut en bas étant représentée par 1 000 au début, pendant l'*admission*, les divers nombres inscrits sur la figure en indiquant les valeurs décroissantes (jusqu'à 0,250).

Pour la transformation du mouvement du piston en rotation, Watt conserva, et on conserva longtemps après lui, le balancier; l'extrémité de la tige du piston, reliée par une courte bielle à une extrémité du balancier, est guidée en ligne droite par le mécanisme ingénieux, mais compliqué

du *parallélogramme* (fig. 4); à l'autre extrémité du balancier s'articule une grande bielle qui commande la *manivelle* calée sur l'*arbre* tournant. Mais au lieu du mécanisme si simple

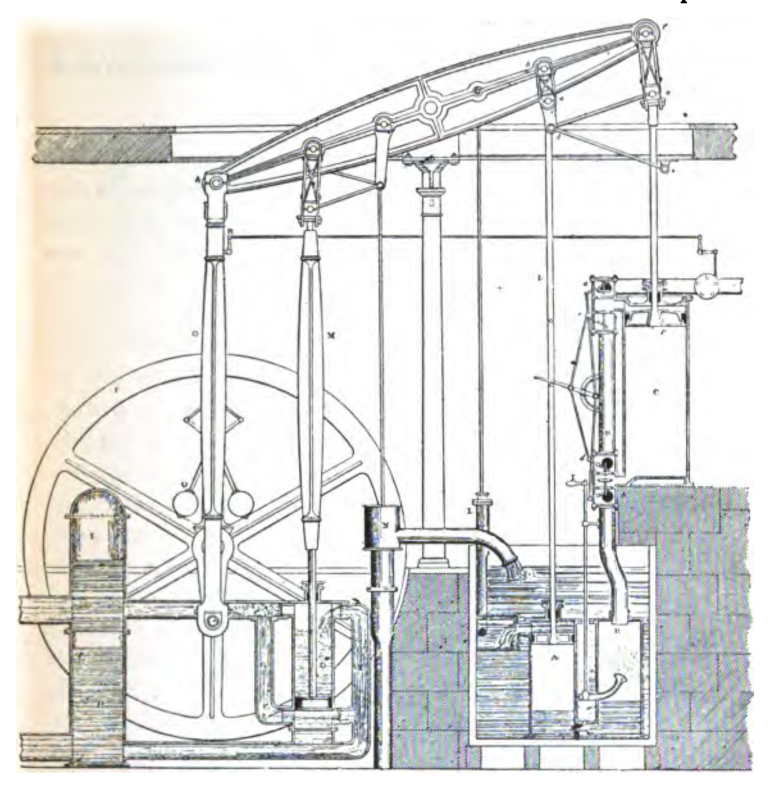


Fig. 5. — Machine à balancier, actionnant une pompe par la bielle M. C est le cylindre, B le condenseur, A la *pompe à air* du condenseur, N la pompe amenant l'eau de condensation, L la *pompe alimentaire* du générateur.

de la manivelle, Watt employa d'abord un système de deux roues dentées dit *solaire* et *planétaire* : une des roues dentées est fixée sur l'arbre, l'autre est invariablement rattachée à l'extrémité de la bielle, de manière à ne pouvoir tourner

autour de son centre, qui est astreint à décrire un cercle autour de l'axe de l'arbre. Avec deux roues dentées d'égal diamètre, ce mécanisme fait tourner l'arbre deux fois plus vite que la manivelle ordinaire.

La figure 5 représente la machine à balancier, avec la manivelle ordinaire.

5. Simplification des machines. — Un progrès notable fut la suppression du balancier, organe qui subsistait après être devenu inutile; dans la machine à *connexion directe*, la bielle réunit directement à la manivelle l'extrémité de la tige du piston, guidée par des glissières rectilignes.

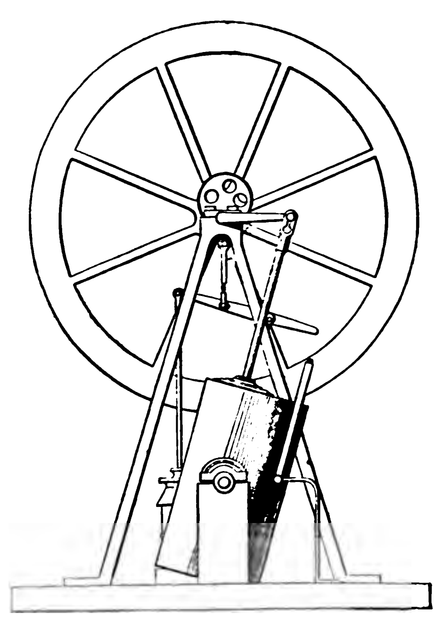


Fig. 6. — Machine à cylindre oscillant de Murdoch, construite en 1785.

La disposition, en réalité assez compliquée, du cylindre oscillant, où la tige du piston s'articule directement sur la manivelle, remonte à la fin du XVIIIe siècle (fig. 6).

Avec des pressions de vapeur supérieures à celle de l'atmosphère, la condensation n'était plus nécessaire; elle fut supprimée dans la machine à *échappement libre*, employée quand l'eau manque pour la condensation, ou bien quand la simplicité et la légèreté des machines ont plus d'importance que l'économie du combustible.

6. Machines à cylindres successifs. — Au lieu de faire tra-

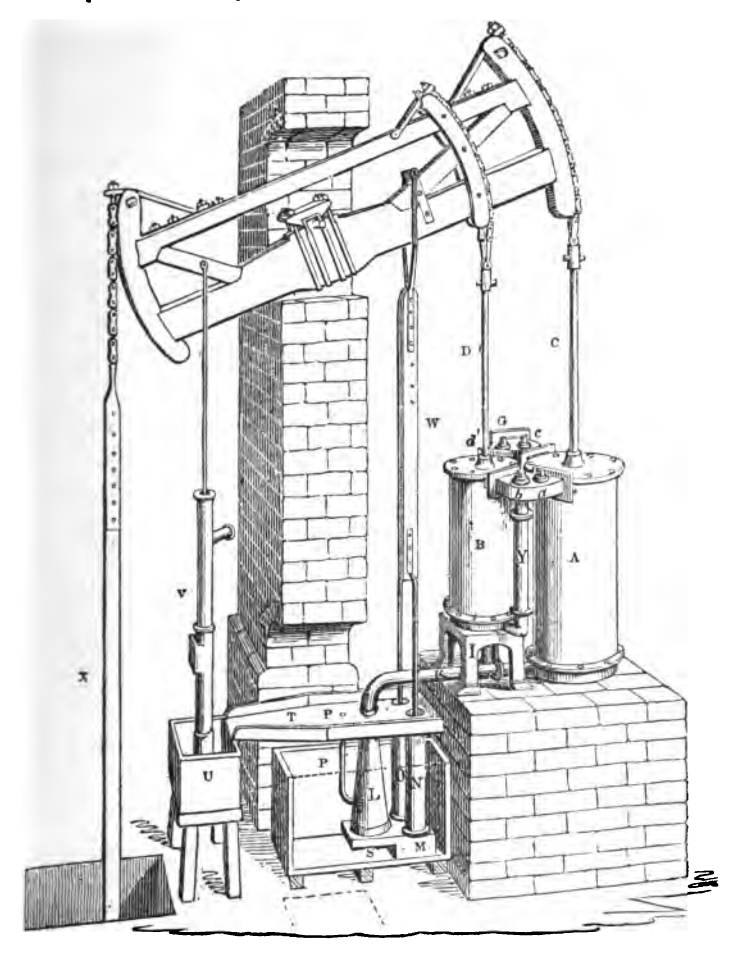


Fig. 7. — Machine à deux cylindres successifs de Hornblower : G, tuyau d'arrivée de vapeur ; *a* et *b*, robinets de distribution.

vailler la vapeur dans un seul cylindre, Hornblower, dès 1776, employa deux cylindres successifs (fig. 7). Le principe

de cette machine reparut en 1804 sous le nom de Woolf : la vapeur, sortant de la chaudière, pénètre dans un premier

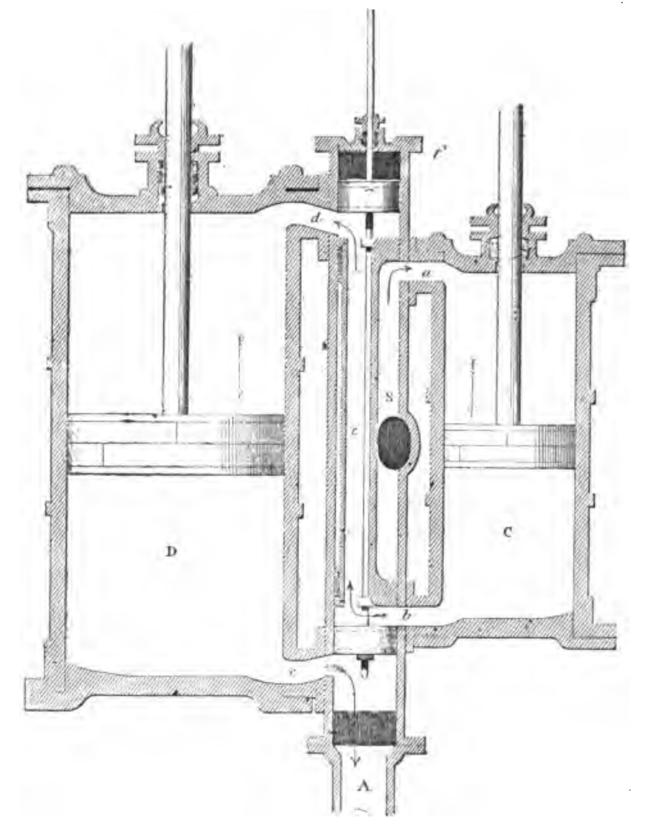


Fig. 8. — Cylindres de la machine de Woolf : la vapeur arrive en *a* dans le petit cylindre ; elle passe du petit dans le grand par *b* et *d* ; elle s'échappe du grand cylindre par *c*. Pendant la course montante des pistons, il y a admission en *b*, transvasement par *ac*. et échappement en *d*.

cylindre pendant toute la course de son piston, puis, pendant le retour de ce piston, elle se détend en se transvasant dans un second cylindre plus grand (fig. 8).

On préfère aujourd'hui une forme dérivée de la machine de Woolf, la machine *compound*, où un *réservoir intermédiaire* de vapeur sépare les deux cylindres successifs. Cette machine fut d'abord employée à la navigation, vers le milieu du XIXe siècle. En 1871 parut la machine à *triple expansion*, à trois cylindres successifs de dimensions croissantes, séparés par deux réservoirs intermédiaires. On est même allé jusqu'à la *quadruple expansion*, dans quatre cylindres successifs.

7. Distribution de la vapeur. — Parmi les perfectionnements les plus saillants apportés aux mécanismes de *distribution* de la vapeur dans les cylindres, on peut citer la coulisse de Stephenson, appliquée en 1842 aux locomotives pour la marche dans les deux sens, et les obturateurs séparés de Corliss, avec fermeture brusque et action automatique du régulateur sur la période d'admission, dispositions qui remontent à l'année 1849.

8. Turbines à vapeur. — Au lieu de faire agir la vapeur par pression sur un piston, on peut la laisser s'écouler de la chaudière au condenseur en un jet rapide, qui actionne les aubes d'une *turbine*. Bien des turbines à vapeur ont été proposées depuis longtemps : mais les applications pratiques, assez récentes, sont dues surtout à Laval et à Parsons, vers 1889. Elles se multiplient depuis quelques années, parfois avec une très grande puissance, atteignant plusieurs milliers de chevaux.

9. Condenseurs. — Au condenseur par mélange de Watt, on substitue souvent le condenseur à surface, où l'eau réfrigérante est séparée de la vapeur à condenser. Essayé par Watt sans grand succès, cet appareil fut établi par Hall, en 1831, avec des dispositions qui ne diffèrent guère de celles qui sont adoptées aujourd'hui (fig. 9); mais on l'abandonna bientôt, pour le reprendre vers 1860. On ne saurait s'en passer aujourd'hui sur mer.

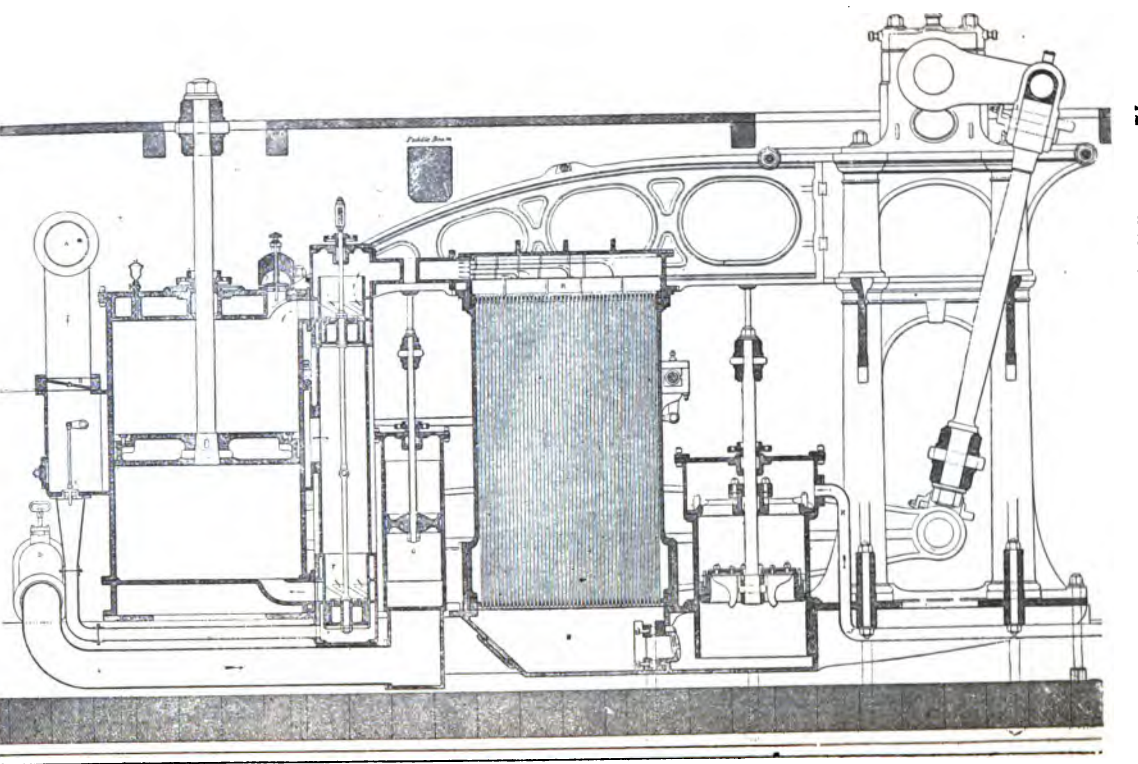


Fig. 9. — Machine du « Wilberforce » (à balanciers inférieurs), construite en 1837, avec condenseur à surface de Hall : la vapeur d'échappement pénètre dans les tubes verticaux du condenseur H ; la pompe de circulation, en G, entretient un courant d'eau autour des tubes, et la pompe à air extrait, à la base du condenseur, l'eau condensée et l'air. La machine est munie d'un tiroir cylindrique. Le dessin ne montre pas les bielles pendantes qui transmettent aux balanciers inférieurs le mouvement du piston.

10. Générateurs. — Séguin inventa en 1828 la chaudière tubulaire de locomotive, décrite et représentée (fig. 10) dans la spécification de son brevet :

« N° 3744, 22 février 1828.

« Brevet d'invention de dix ans aux sieurs Séguin et Cie, à Lyon, pour la construction perfectionnée d'une chaudière à tubes creux. »

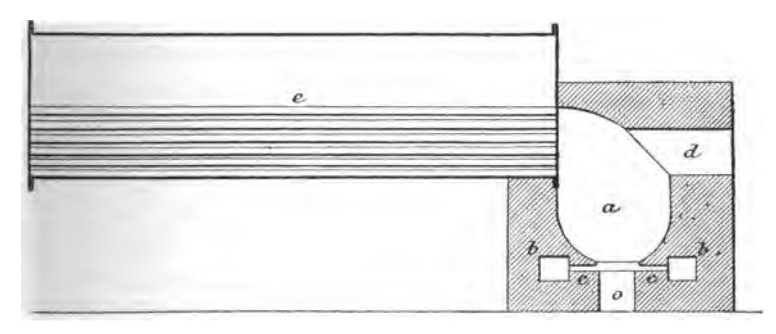


Fig. 10. — Chaudière à vapeur, par Marc Seguin (d'après la spécification du brevet).

a, fourneau alimenté par un ventilateur ou autrement. — *b*, chambres d'air. — *c*, tuyaux amenant l'air au foyer. — *d*, porte pour alimenter le fourneau. — *e*, tuyaux calorifères. — *o*, foyer.

« La vapeur se produisant en raison de la surface de chauffe, on a pensé qu'un moyen simple et tenant le moins d'espace possible était de faire une chaudière tubulaire.

« Celle inventée par nous se compose donc, comme on le voit dans le dessin, d'un nombre plus ou moins grand de tubes qui sont traversés par le calorique, et ces tubes, entourés d'eau, forment une très grande surface de chauffe. »

La chaudière *à tubes d'eau* de Belleville, composée de gros tubes rectilignes, est une des plus anciennes de ce genre et remonte à 1850.

CHAPITRE II

LOIS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES

11. Vitesse et accélération. — Pour l'étude des machines, il est indispensable de bien se rappeler les définitions précises de la *vitesse* et de l'*accélération*. La vitesse d'un point est le rapport d'une longueur parcourue par ce point à la durée du parcours. Dans le mouvement *uniforme*, les longueurs parcourues pendant une même durée sont les mêmes, et le rapport de la longueur au temps, ou vitesse, reste constant. On l'exprime soit en mètres par seconde, soit à l'aide d'autres unités de longueur et de temps.

Dans le mouvement *varié*, il faut considérer un très petit parcours, effectué pendant un temps très court. C'est la limite du rapport, dont les deux termes sont *infiniment petits*, qui donne la vitesse à l'instant considéré. On continue à l'exprimer en mètres par seconde, ou même en kilomètres à l'heure : mais ce nombre de mètres ou de kilomètres ne serait effectivement parcouru en une seconde ou en une heure que si le mouvement devenait uniforme à l'instant considéré.

Dans la *rotation* autour d'un axe, chaque point du corps tournant décrit un cercle, dont le centre est sur l'axe ; les vitesses des différents points sont à chaque instant proportionnelles aux rayons de ces cercles, et, si on considère une durée quelconque, tous les points décrivent le même angle pendant cette durée. On appelle *vitesse angulaire* le rapport de ce déplacement angulaire commun à la durée du déplacement, durée quelconque dans une rotation uniforme, durée infiniment petite dans une rotation variée. Si on mesure les

angles en *radians* (§ 2), la vitesse angulaire, en radians par seconde, est exprimée par le même nombre que la vitesse linéaire, en mètres par seconde, d'un point situé à un mètre de l'axe de rotation.

On définit souvent la vitesse angulaire moyenne des machines par le nombre de tours en une minute. En multipliant ce nombre par 0,10473, on obtient la vitesse angulaire en radians par seconde. Inversement, en multipliant par 9,5493 la vitesse en radians par seconde, on obtient le nombre de tours par minute.

En considérant deux positions successives d'un point qui se meut en ligne droite, la vitesse n'est en général pas la même dans les deux positions : on appelle *accélération* le rapport de la variation de vitesse à la durée du passage d'une position à l'autre, lorsque ces quantités deviennent infiniment petites, les deux positions considérées étant infiniment voisines. Dans le mouvement *uniformement accéléré*, la valeur de l'accélération[1] est constante, quelles que soient les deux positions considérées. Par exemple, la chute libre d'un corps est un mouvement uniformément accéléré, dont la vitesse augmente en une seconde d'environ 9,81 m par seconde. Avec ces unités de longueur et de temps, la valeur de l'accélération est donc 9,81[2].

[1] L'accélération est *positive* quand la vitesse augmente, et *négative* quand la vitesse diminue : le mouvement est dit alors *retardé*.

[2] Au bout de la première seconde de chute la vitesse est de 9.81 m par seconde, de 19,62 m par seconde après deux secondes, etc. Le nombre qui représente l'accélération est en réalité une fraction qui a pour numérateur une longueur, exprimée avec l'unité choisie, et pour déterminateur le carré de l'unité de temps : par exemple, pour calculer la valeur de l'accélération dans la chute des corps en prenant pour unités le km et l'heure, au lieu du mètre et de la seconde, on exprime le numérateur par un nombre 1 000 fois plus petit, et le dénominateur par un nombre 3 600 × 3 600 fois, ou 12 960 000 fois plus petit, ce qui donne, en appliquant la règle de la division des fractions, 000 981 × 12 960 000 ou 127 100. Au bout d'une heure (en supposant que le mouvement se maintienne uniformément accéléré, ce qui n'a pas lieu en réalité), la vitesse aurait augmenté de 127 100 km à l'heure.

Lorsque le point décrit une trajectoire courbe, la même expression représente l'*accélération tangentielle*[1].

12. Force, travail, puissance. — Les machines sont soumises à l'action de *forces*. Dans une force on distingue la *grandeur* et la *direction*. La pesanteur est une force de direction verticale; elle fournit l'unité usuelle de force, qui est le poids d'un kilogramme.

Le *travail* effectué par une force sur un point, qui se meut suivant la direction de la force, est le produit de la force par le chemin parcouru : ce travail est dit *moteur*. Quand le mouvement a lieu, au contraire, dans une direction exactement opposée à celle de la force, la valeur absolue du travail est la même, mais il est dit *résistant*. Quand la trajectoire fait un angle avec la direction de la force, le travail est le produit de la force par la projection, sur la direction de la force, du chemin parcouru. Si la force agit perpendiculairement à la direction du mouvement, cette projection est nulle, et la force ne donne lieu à aucun travail, moteur ou résistant.

L'unité usuelle de travail correspond au parcours d'un mètre suivant la direction d'une force d'un kilogramme : c'est le *kilogrammètre* (kgm).

La considération du travail fournit une mesure commune qui permet d'évaluer les services des moteurs et les besoins des appareils qu'ils commandent. Mais, pour apprécier le fonctionnement d'une machine, il ne suffit pas de connaître le travail qu'elle produit (ou qu'elle absorbe) : le *temps* employé est un élément essentiel. On appelle *puissance* d'une machine le rapport du travail à la durée de l'opération. Le temps étant compté en secondes, et le travail en kilogrammètres, la puissance se mesure par le nombre de kilogrammètres produits (ou dépensés) en une seconde, mais il ne

[1] La mécanique distingue aussi l'*accélération normale*, dirigée suivant la normale à la trajectoire dans le *plan osculateur*, et dont l'expression est $\frac{V^2}{\rho}$, V étant la vitesse, et ρ le *rayon de courbure*.

faut pas oublier qu'en réalité la *puissance* est exprimée par un *rapport*.

Par nombre de kilogrammètres en une seconde, on entend presque toujours le nombre moyen correspondant à une certaine période de marche, car le travail produit n'est généralement pas le même pendant chaque seconde.

Pour éviter de trop grands nombres, au lieu de compter la puissance en kilogrammètres par seconde, on a choisi une unité 75 fois plus grande, dite *cheval-vapeur*. Un cheval-vapeur, ou le travail de 75 kgm accompli en une seconde, équivaut à l'élévation, en une seconde, de 75 kg à un mètre de hauteur.

On emploie aussi une autre unité de puissance, le *kilowatt*, qui correspond à peu près à 102 kgm par seconde.

Étant donnée une puissance en chevaux, pour l'exprimer en kilowatts, on multiplie le nombre de chevaux par 0,73545 (approximativement on prend les trois quarts de ce nombre); inversement, le nombre de chevaux est égal au nombre de kilowatts multiplié par 1, 35971, ou approximativement au nombre de kilowatts augmenté d'un tiers. Le plus souvent les puissances ne sont pas connues avec une précision suffisante pour qu'il soit utile d'employer, dans ces conversions, toutes les décimales indiquées.

Par une faute de langage assez commune, on dit force en chevaux au lieu de *puissance*, en oubliant que le mot force a une signification tout autre dans le vocabulaire mécanique.

Quand une machine a produit un cheval pendant une heure, ou un *cheval-heure*, cette machine a produit 75 kgm par seconde pendant 3 600 secondes, c'est-à-dire un *travail* de 270 000 kgm. De même, le *kilowatt-heure* est une unité de *travail* qui vaut environ 102 × 3 600, ou 367 200 kgm.

13. Pressions. — Parmi les forces mises en jeu dans les machines, la *pression des fluides* joue un rôle capital, et il est indispensable, pour comprendre le fonctionnement des appareils, de se rendre compte bien clairement de ce qu'est

une pression, par la réflexion, par la lecture et surtout par la vue des expériences et l'observation. Quand le fluide est un gaz ou une vapeur, cette pression s'exerce également sur toutes les parois qui l'enferment, à moins que le volume enfermé ne soit très vaste, ou que le fluide ne se meuve rapidement. Dans les machines, la vapeur n'occupe pas un grand volume, mais quelquefois elle forme des courants rapides. La *pression* est le rapport de la force, qui agit sur une surface, à l'étendue de cette surface ; on la compte en kg par cm^2 ; c'est le rapport d'un nombre de kg à un nombre de cm^2. La force est perpendiculaire à la surface pressée. Avec la constance de la pression sur toutes les parois pressées, peu importe l'étendue considérée ; avec la pression variable d'un point à l'autre, comme celle qu'exercent les liquides, la pression en un point est la limite de ce même rapport quand la surface envisagée devient infiniment petite.

On définit d'une manière analogue la pression en un point pris au milieu de la masse fluide, après avoir démontré qu'elle est la même sur un plan fictif quelconque passant par ce point. Cette définition s'étend aux diverses parties d'un fluide en mouvement.

Une chaudière, pressée à l'intérieur par la vapeur, supporte aussi la pression extérieure de l'atmosphère : les tôles résistent seulement à la différence de ces deux pressions. C'est pourquoi on compte souvent la pression dite *effective,* c'est-à-dire la pression réelle (dite *absolue*) diminuée de celle de l'atmosphère. Comme cette dernière pression est variable, on la suppose égale à une valeur de convention qui correspond à une hauteur barométrique de 760 mm ou à 1,0334 kg par cm^2. Pour plus de simplicité, on peut admettre que l'atmosphère produit une pression d'un kg par cm^2.

Lorsque la vapeur exerce une pression de 5 kg par cm^2 sur un piston dont la surface est de 2 000 cm^2 (ou 0,2 m^2), elle le pousse avec une force de 10 000 kg : si la course accomplie sous l'action de cette pression constante est de

1 m, le travail reçu par le piston sera de 10000 kgm. Le produit de la surface du piston par sa course mesure le volume qu'il *engendre*, volume que la vapeur remplit. On voit facilement que si ce volume est exprimé par un nombre de litres, le produit de ce nombre par 10 fois la pression en kg par cm^2 donne le nombre des kgm produits par une course simple.

14. Mesure des pressions. — La pression atmosphérique se mesure à l'aide du *baromètre :* la colonne de mercure de cet instrument, soustraite à toute pression à sa partie supérieure, fait équilibre à l'atmosphère, en exerçant à sa base une pression égale. L'atmosphère dite normale correspond à une hauteur de mercure de 760 mm, qui exerce une pression de 1,0334 kg par cm^2. Si la section du tube est de 0, 25 cm^2, le poids du mercure qu'il contient est alors $0{,}25 \times 1{,}0334$ ou 258,35 g. Sur les machines, le baromètre peut servir à mesurer des pressions inférieures à celle de l'atmosphère ou ne la dépassant pas trop : certains condenseurs sont munis de cet instrument.

Pour mesurer des différences de pression entre deux enceintes, on se sert de *manomètres* formés d'un tube en forme d'U, ouvert aux deux bouts : un des bouts communique avec une enceinte, l'autre bout avec la seconde enceinte. Ce tube renferme un liquide, eau ou mercure suivant la valeur des différences de pression à mesurer : la différence des niveaux de la colonne liquide, dans les deux branches, mesure la différence des pressions. Avec l'eau, une différence de 1 m correspond à une différence de pression de 0,1 kg par cm^2. Avec le mercure, 760 mm correspondent à une différence de pression d'une atmosphère, ou 1,0334 kg par cm^2. Si l'une des branches s'ouvre librement dans l'atmosphère, ce qui est le cas usuel, le manomètre indique la pression dite effective sur l'autre branche.

Pour les pressions un peu élevées, on fait usage de manomètres métalliques, composés d'un tube flexible courbé, fixé

à une extrémité, en communication avec l'enceinte où l'on veut mesurer la pression, et fermé à l'autre extrémité ; cette extrémité libre commande une aiguille (fig. 11) : la pression à mesurer, s'exerçant à l'intérieur de ce tube, le déforme plus ou moins. Ces manomètres sont généralement

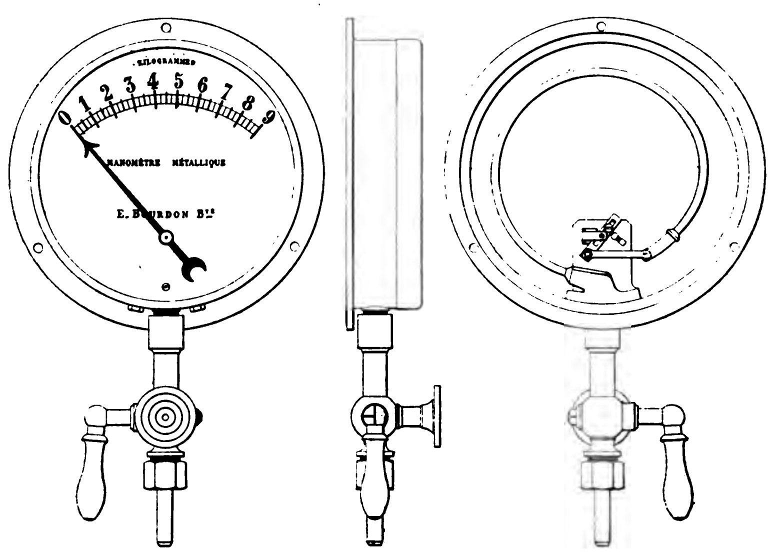


Fig. 11. — Manomètre Bourdon, à tube métallique. La pression à l'intérieur du tube le déforme et en déplace l'extrémité libre, qui est reliée à l'aiguille.

gradués de manière à indiquer les pressions effectives en kg par cm². On les vérifie à l'aide de manomètres étalons recevant la même pression. Les étalons, eux-mêmes, doivent être l'objet de vérifications spéciales, au besoin à l'aide de manomètres à mercure à air libre, qui sont les plus exacts.

15. Chaleur. — Les variations de la température, données par les *thermomètres*, sont rapportées aux changements du volume d'un corps, ou bien aux variations de la pression

d'un volume constant de gaz. Selon le corps employé à la confection du thermomètre, on peut obtenir des échelles différentes des températures, qui ne coïncident exactement qu'en certains points choisis comme repères.

Le comité international des poids et mesures a défini les températures par les pressions d'un volume constant d'hydrogène, mesurées dans certaines conditions bien déterminées. Les thermomètres à mercure donnent des indications suffisamment précises pour la plupart des applications entre 0° et 300°, limite qui n'est guère dépassée par la vapeur.

Pour la mesure des températures plus élevées, on emploie des instruments nommés *pyromètres;* même certains thermomètres à mercure sont disposés pour fonctionner jusqu'à 500°.

Bien que la chaleur se présente dans des conditions fort diverses, avec des températures variables, c'est une grandeur qu'on peut mesurer. L'unité usuelle est la *calorie* : c'est la quantité de chaleur qui, incorporée entièrement dans la masse d'un kilogramme d'eau prise à 0°, en élève la température de 1°, sans autre phénomène que l'échauffement du liquide.

Un appareil à vapeur est le siège de nombreuses transmissions de la chaleur, source de sa puissance. Dégagée dans le foyer, la chaleur pénètre dans la chaudière pour y chauffer et y vaporiser l'eau. La vapeur produite circule dans des tuyaux, dont les enveloppes isolantes ne peuvent empêcher la fuite de quelques calories. La chaleur s'échange entre la vapeur et les parois des cylindres moteurs ; enfin le condenseur produit le refroidissement final du fluide qui a traversé les cylindres.

La transmission de chaleur la plus simple se fait par le *mélange* de deux corps possédant des températures différentes. Dans ce mélange, qui n'est guère possible qu'entre les fluides, les deux corps prennent une température commune. L'alimentation des chaudières par envoi de l'eau

froide dans la vapeur, ou dans l'eau chaude, la condensation par injection, offrent des exemples de ce mode de transmission.

Un corps abandonne ou reçoit de la chaleur par *rayonnement*, soit quand il isole une enceinte absolument vide, soit quand il est en contact avec un fluide ; dans ce second cas, en même temps, la chaleur se communique par *convection*, c'est-à-dire par contact avec renouvellement des parties fluides.

Enfin la chaleur se propage à l'intérieur des corps par *conductibilité*. Dans cette transmission, le corps s'échauffe de proche en proche d'une manière assez lente, même quand il est *bon conducteur*.

Des quatre modes de transmission de la chaleur, par *mélange*, par *conductibilité*, par *rayonnement*, et par *convection*, les deux premiers obéissent à des lois simples ; les deux autres sont des phénomènes complexes et qui se superposent fréquemment. La physique a déterminé les lois du rayonnement seul : mais l'activité de la convection, par sa nature même, est très variable. En pareil cas, on applique fréquemment la loi de *Newton :* le nombre de calories échangées, en une seconde, entre un mètre carré de la surface d'un corps et un fluide, est proportionnel à la différence des températures qui existent à la surface du corps et dans le fluide. Cette loi n'est applicable avec quelque précision que si la différence de température n'est pas trop grande.

Une loi physique, des plus intéressantes et des plus simples, appliquée dans l'étude des machines à vapeur, loi que l'observation de ces machines a même contribué à établir, est celle de l'équivalence de la chaleur et du travail : le travail peut donner naissance à la chaleur, comme dans les phénomènes du frottement ; inversement, dans les machines, une certaine quantité de chaleur disparaît et se transforme en travail. Dans ces transformations, lorsqu'on peut éliminer tous les phénomènes accessoires et les déperditions de travail et de chaleur, on trouve une exacte con-

cordance entre la quantité de chaleur disparue et le travail produit, ou entre le travail qui disparaît et la chaleur qu'il développe : à une calorie correspondent 426 kgm (c'est du moins le nombre généralement admis aujourd'hui d'après la moyenne des meilleures expériences) ; cela veut dire que 426 kgm peuvent se convertir en une calorie, ou qu'une calorie qui disparaît peut donner naissance à un travail de 426 kgm [1].

On commettrait une erreur des plus graves en supposant que les machines peuvent ainsi transformer en travail toute la chaleur que l'eau vaporisée reçoit dans la chaudière. Une autre loi physique, des plus importantes, enseigne qu'une fraction seulement de cette quantité de chaleur peut être utilisée pour la production du travail mécanique ; cette fraction dépend des températures de formation dans la chaudière et de condensation de la vapeur.

16. Diagrammes figurant les états d'un fluide. — Les diagrammes géométriques représentent clairement les transformations physiques d'un fluide, en montrant les valeurs correspondantes de deux éléments caractéristiques. Pour une masse déterminée du fluide, de préférence un kilogramme, le volume occupé est figuré par une longueur O*a*, portée en *abscisse* sur l'axe OV (fig. 12), et la pression par l'*ordonnée a*A, de sorte que la position du point A indique, à une échelle connue, la valeur de ces deux éléments; chaque point figure ainsi un état du fluide.

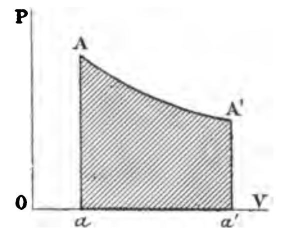


Fig. 12. — Diagramme des pressions et volumes.

[1] Dans les formules, on représente habituellement par la lettre E le nombre de 426 kgm, *équivalent mécanique de la chaleur*. On emploie aussi le nombre inverse ou la fraction $\frac{1}{426}$, fraction de calorie qui correspond à un kilogrammètre, en la désignant par la lettre A.

caractérisé par la pression et le volume d'un kilogramme; plusieurs états successifs sont figurés par une ligne telle que AA'.

Ce diagramme fait aussi connaître le travail produit par le kilogramme de fluide, qu'on suppose pousser un piston : si la pression reste invariable, la ligne AA' est une droite parallèle à l'axe OV, et le travail produit est égal au produit de la pression par l'accroissement du volume *aa'*; il est donc figuré par la surface d'un rectangle qui a pour côtés AA' et *aa'*. Quand la pression varie, le travail est figuré par la surface comprise entre la ligne AA', quelle qu'elle soit, et les droites *a*A, *aa'* et *a'*A' (couverte de hachures sur la figure).

Ce travail est moteur ou *positif* quand le corps passe de l'état A à l'état A', c'est-à-dire quand son volume augmente. Si au contraire il passe de A' à A, le volume diminue, il faut que le piston comprime le fluide, et le travail exercé contre ce piston est résistant ou *négatif*.

17. Propriétés des vapeurs. — Une *vapeur* résulte de la transformation d'un liquide qui passe à l'état gazeux; en se *condensant* elle reprend l'état liquide. Elle est dite *saturée* tant qu'elle est en contact avec le liquide qui la produit; sa pression dépend alors uniquement de la température, quel que soit le volume occupé; si on augmente ou si on diminue la capacité qui renferme la vapeur saturée, en lui fournissant ou en lui soustrayant une quantité convenable de chaleur, de manière à en maintenir la température constante, la pression ne varie pas, tant qu'il subsiste du liquide. Un cas limite intéressant est celui où disparaît la dernière particule liquide : la vapeur est encore saturée; elle est dite *saturée sèche*. Si on continue à augmenter le volume offert à la vapeur, en maintenant toujours constante la pression, la température ne reste plus la même, mais augmente : la vapeur est dite alors *surchauffée*.

Lorsqu'une partie seulement du liquide est passée à l'état

de vapeur, cette vapeur est souvent séparée nettement du reste du liquide; considérée isolément, elle est saturée sèche. Au contraire, le liquide peut être intimement mélangé à la vapeur sous forme de gouttelettes ou de vésicules. Ainsi mélangée d'eau, la vapeur forme des nuages blancs lorsqu'elle s'échappe dans l'atmosphère; la vapeur sèche est au contraire un fluide invisible.

Puisque la température de la vapeur saturée est déterminée pour chaque pression, un *thermomètre*, mesurant cette température, pourrait remplacer le *manomètre* d'une chaudière, où la vapeur se trouve en contact avec le liquide.

L'illustre physicien Regnault a mesuré, avec grande précision, les quantités de chaleur nécessaires pour transformer un kilogramme d'eau, prise à la température du zéro centigrade, en vapeur sèche à une température donnée, le liquide et sa vapeur étant constamment soumis à la pression qui correspond à cette température. La quantité de chaleur, nécessaire pour une transformation d'un corps, n'est déterminable, en effet, que si la loi de la transformation est précisée. Il faut d'abord échauffer l'eau jusqu'à la température choisie pour la vaporisation et lui fournir ce qu'on appelle la *chaleur du liquide*, qui est d'environ une calorie pour chaque degré d'échauffement[1]. Ensuite, pour vaporiser l'eau sans que la température change, il faut lui fournir la *chaleur de vaporisation*. On appelle *chaleur totale* la somme de la chaleur du liquide et de la chaleur de vaporisation.

Pendant la vaporisation, le volume du kilogramme de fluide augmente beaucoup (il y a bien aussi dilatation pendant l'échauffement de l'eau, mais elle est minime); on peut

[1] Pour échauffer le kilogramme d'eau de 0° à 1°, la quantité de chaleur nécessaire est par définition, la calorie. Sous une température supérieure, la quantité de chaleur nécessaire pour gagner un degré est un peu plus grande. Ainsi, pour chauffer l'eau de 0° à 100°, il faut lui fournir non 100 mais 100,5 calories; pour atteindre 200°, elle exige 203,2 calories.

supposer que la vapeur formée soulève un piston chargé d'un poids convenable ; elle exerce ainsi un travail mécanique. On calcule la valeur de ce travail en multipliant la force qui soulève le piston par le chemin qu'il parcourt, ou bien la pression, en kg par m^2, par l'augmentation de volume en m^3.

C'est une partie de la chaleur fournie au fluide qui se métamorphose alors en travail, tandis que le reste le vaporise ; la *chaleur de vaporisation* se transforme ainsi en deux parts ; une de ces parts, dite *chaleur latente interne*, produit la modification physique du fluide, et l'autre, la *chaleur latente externe*, se transforme en travail [1].

Une formule simple permet de calculer la chaleur totale pour un kg d'eau prise à 0° et vaporisée à la température θ : c'est, en calories, $606{,}5 + 0{,}305\ \theta$; par exemple pour $\theta = 100°$, il faut 637 calories.

La table ci-contre est relative à la vapeur d'eau pour diverses températures [2].

On remarquera combien la chaleur de vaporisation de l'eau est grande, aux températures ordinaires où se fait cette vaporisation dans les chaudières.

Les pressions données dans le tableau sont les pressions absolues : pour passer aux pressions effectives il suffit d'en retrancher 1,0334 kg, ou simplement 1, en négligeant les décimales. Si l'eau à vaporiser, au lieu d'être à 0°, est

[1] Pour désigner ces quantités de chaleur, on fait usage de notations, qui sont universellement admises. La lettre grecque λ exprime la chaleur totale à fournir ; q est la chaleur du liquide, r la chaleur de vaporisation. La fraction de la chaleur de vaporisation qui se transforme en travail mécanique est représentée par Apu, A étant l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur (voir p. 23), p la pression, u l'accroissement de volume dans la vaporisation. Le reste de la chaleur de vaporisation est désigné par la lettre grecque ρ. On a, par suite, les égalités :

$$\lambda = q + r$$

et

$$r = \rho + Apu$$

[2] Une table détaillée, de 5° en 5° de degrés, se trouve dans la *Thermodynamique et ses applications* par M. Madamet.

prise à une température plus élevée, 15° par exemple, la quantité de chaleur à fournir est diminuée de celle qui est nécessaire pour chauffer l'eau de 0° à 15°, soit approximativement 15 calories.

TEMPÉRATURE	PRESSION en kg par cm²	CHALEUR du liquide (q) en calories.	CHALEUR de vaporisation (r) en calories.	CHALEUR latente interne (ρ) en calories.	POIDS DU M³ de vapeur saturée sèche en kg.
30°	0,0429	30,03	585,62	551,95	0,030
40°	0,0747	40,05	578,65	544,04	0,051
50°	0,1251	50,09	571,66	536,10	0,083
100°	1,0334	100,50	536,50	496,31	0,606
110°	1,4623	110,64	529 41	488,34	0,839
120°	2,0278	120.81	522,29	480,42	1,141
130°	2,7607	131,00	515,15	472,50	1,524
140°	3,6953	141,21	507,99	464,59	2,004
150°	4,8695	151,46	500,79	456,69	2,597
160°	6,3250	161,74	493,56	448,78	3,320
170°	8,1063	172,05	486,30	440,88	4,192
180°	10,2611	182,40	479,00	432,97	5,230
190°	12,8396	192,78	471,67	425,07	6,456
195°	14,3039	197,98	467,99	421 11	7,145
200°	15,8939	203,20	464,30	417,15	7,888

Pour surchauffer la vapeur à pression constante, il faut lui fournir une quantité de chaleur que les physiciens n'ont pas encore déterminée avec une grande précision, mais qui est approximativement de 0,48 calorie par degré de surchauffe, pour un kg. Par exemple pour surchauffer un kg de vapeur de 200° à 250°, sous la pression de 15,9 kg par cm², correspondant à 200°, il faut lui fournir 50 × 0,48 ou 24 calories.

Inversement, quand la vapeur se condense, si la température de l'eau condensée reste celle de la vapeur, la quantité de chaleur abandonnée par un kg est égale à la chaleur totale de vaporisation sous cette température ; si de plus l'eau se refroidit d'un certain nombre de degrés, elle abandonne la chaleur correspondante du liquide, soit à peu près une calorie par degré.

Pour d'autres liquides que l'eau, il y a également un chaleur du liquide et une chaleur de vaporisation, mai avec des valeurs différentes; la pression est aussi différent pour une même température.

Voici par exemple quelques nombres relatifs à l'éther, qı a été employé dans certains moteurs :

TEMPÉRATURE	PRESSION en kg par cm²	CHALEUR du liquide en calories.	CHALEUR de vaporisation en calories.	POIDS du m³ de vapeuı saturée sèche en kg.
10°	0,25	5,32	93,12	1,19
40°	1,23	21,63	89,48	3,49
70°	2,87	38,48	84,30	8,35
100°	6,74	55,86	77,58	17,35
120°	10,50	67,74	72,26	27,6

En voyant la faible chaleur de vaporisation de l'éthe comparée à celle de l'eau, on pourrait penser que l'usag de ce fluide serait plus avantageux dans les machines mais on perdrait de vue que les nombres des tableau s'appliquent au kilogramme, tandis qu'il faut produire l même volume de vapeur, sous la même pression, pour avoi une marche comparable. Or, en partant du liquide à 0°, faut environ 3 500 calories (5,23 × 661,4) pour obtenir u m³ de vapeur d'eau à la pression de 10,26 kg par cm², tan dis qu'un m³ de vapeur d'éther à 120° (pression 10,5 kg pa cm²) exige environ 3 900 calories (27,6 × 140).

CHAPITRE III

CONSTITUTION GÉNÉRALE

18. Modes d'action de la vapeur. — On utilise l'action motrice de la vapeur, produite dans une chaudière, de deux manières essentiellement différentes : on la fait agir par sa pression ou par la force vive du jet qui s'écoule de la chaudière dans l'enceinte à pression inférieure, condenseur ou atmosphère. La pression s'exerce sur un piston circulaire qui se meut dans un cylindre[1] : c'est de beaucoup le mode d'emploi le plus fréquent. Dans les machines *rotatives*, la pression agit sur des pièces mobiles de formes diverses. Enfin, elle s'exerce directement sur un liquide à élever, dans le *pulsomètre* actuel et dans l'antique machine de Savery.

Les jets de vapeur sont employés de deux manières différentes ; ou bien ils entraînent un autre fluide, gazeux ou liquide, et constituent des souffleries et des appareils élévatoires (souffleurs et aspirateurs d'air, éjecteurs à air et à eau, injecteurs) ou bien ils agissent sur les aubes d'une *turbine* et leur communiquent un mouvement de rotation[2].

19. Cylindres et pistons. — Le piston circulaire se mouvant dans un cylindre est un organe mécanique fort ancien et qu'il était naturel d'utiliser pour la machine à vapeur.

[1] L'expression géométrique exacte est *cylindre de révolution*, ou *cylindre droit à base circulaire;* l'expression *cylindre* est, en géométrie, beaucoup plus générale.

[2] Afin d'éviter des répétitions peu utiles, il ne sera question dans le présent chapitre que des machines où la vapeur agit par pression.

La difficulté était d'exécuter, avec une précision suffi
les cylindres de grand diamètre et de grande cours
étaient nécessaires. C'est ainsi qu'une machine de Ne
men avait un cylindre de 1,68 m de diamètre sur 3 1
course : la production d'une aussi grande pièce de font
remarquable pour l'époque.

Le piston doit former joint étanche contre la surface cylindre. Au début, on s'est servi des procédés en usage p les pistons des pompes, entourés de matières tenaces plastiques, telles que des tresses de chanvre. Cette gar ture en chanvre se loge dans une gorge que porte la su face cylindrique extérieure du piston. Mais avec l'élévati de la pression et, par suite, de la température de la vapeu ces matières végétales sont devenues insuffisantes, parc qu'elles se carbonisaient rapidement ; on les a remplacée par des pièces métalliques. On a d'abord muni le pistor d'une série de pièces, ou *segments*, en forme d'arcs de cercle, pressés contre le cylindre, avec d'autres pièces intérieures recouvrant les joints que les segments laissent entre eux. Puis on est arrivé à la disposition actuelle des bagues élastiques fendues encore appelées, à tort, *segments* (voir § 73).

Le *double effet*, qui utilise les deux faces du piston pour recevoir le travail de la vapeur, est un grand perfectionnement ; alors la *tige* du piston doit traverser le *couvercle* ou *plateau* qui ferme le cylindre, en passant à travers un bourrage qui empêche les fuites. Composé d'abord et pendant longtemps de matières végétales, chanvre, tresses de coton, serrées autour de la tige, par le *presse-étoupe*, dans un logement ménagé dans le plateau, ce bourrage a été remplacé par des *garnitures métalliques*, résistant aux températures les plus élevées de la vapeur.

20. Transmission du mouvement du piston. — Le mouvement rectiligne alternatif du piston moteur peut être directement utilisé dans certains cas, notamment pour la commande du piston d'une pompe. Dans les premières

applications, à l'épuisement des mines, comme les pompes étaient installées dans un puits, on a été conduit à placer le cylindre moteur verticalement à côté du puits, et à établir la liaison par un balancier, oscillant sur un support fixe : la tige des pompes et le piston étaient attachés aux extrémités du balancier par des chaînes.

Mais quand les applications de la machine à vapeur se sont multipliées, on a désiré obtenir un mouvement de rotation, soit qu'il fût directement utilisable, par exemple pour faire tourner un laminoir ou un ventilateur, soit pour la transmission et la distribution de la puissance motrice à divers appareils, au moyen d'*arbres de couche*. Ce mouvement circulaire est d'ailleurs si commode qu'on le trouve dans la plupart des machines-outils, même lorsque le mouvement final nécessaire est rectiligne, comme dans une machine à raboter.

La transformation du mouvement rectiligne alternatif en mouvement circulaire se fait simplement au moyen d'une bielle, dont une extrémité (la *petite tête* ou le *pied*) s'articule sur un tourillon que porte une extrémité de la pièce à mouvement rectiligne (la *tête* ou *crosse de piston*), et dont l'autre extrémité (la *grosse tête*) est articulée sur un tourillon faisant corps avec une *manivelle* calée sur l'arbre, tourillon dont le centre décrit un cercle. La tête de piston est guidée en ligne droite par des patins qu'elle porte et qui frottent sur les *glissières*, solidement attachées au *bâti*. Dans la machine à simple effet, la bielle peut être articulée sur le piston même, qui n'a plus de tige, mais auquel on donne une longueur suffisante pour qu'il soit bien guidé en ligne droite, sans que le coincement ou *arc-boutement* dans le cylindre soit à craindre.

Ce système de transmission, très simple, et dont les applications sont innombrables, est fort ancien. On voit qu'il se compose de quatre parties essentielles : le bâti, avec le cylindre, les glissières, les paliers de l'arbre, c'est-à-dire la partie fixe, invariablement reliée à la fondation ; le piston,

avec la tige et la tête de piston, partie animée du mouvement rectiligne alternatif; l'arbre, avec la manivelle, tournant dans ses paliers; enfin la bielle, qui réunit la partie à mouvement rectiligne et la partie tournante, à l'aide des articulations, qu'elle présente à ses deux extrémités, sur deux tourillons cylindriques.

La *longueur* de la bielle est la distance entre les centres des deux articulations cylindriques qui la terminent, de même que le *rayon* de la manivelle est la distance du centre de l'arbre au centre du tourillon de la manivelle, sur lequel s'articule la bielle. La longueur de la bielle est ordinairement 5 à 7 fois le rayon de la manivelle : une bielle de 4 rayons est fort courte. On est exceptionnellement descendu en dessous de cette longueur.

L'axe du cylindre, prolongé, rencontre l'axe de l'arbre tournant. Dans certaines applications de ce mécanisme de transmission et même, exceptionnellement, dans certaines machines à vapeur, l'axe du cylindre est déporté, parallèlement à sa position normale, et ne rencontre pas l'axe de l'arbre. Il en résulte que les deux courses simples du piston, faites en sens opposés, ne correspondent plus chacune exactement à un demi-tour de l'arbre.

Ce mécanisme, bien que déjà connu, n'a pas été appliqué dans les premières machines à vapeur à mouvement de rotation. On a conservé le balancier, en reliant à la manivelle de l'arbre, par une bielle, l'extrémité qui commandait les pompes. Même, au début, Watt a employé, pour rattacher la bielle à l'arbre, le mécanisme bizarre dit planétaire. De l'autre côté, une courte bielle relie au balancier l'extrémité de la tige du piston, guidée en ligne droite par le système ingénieux mais compliqué du *parallélogramme* (auquel on a parfois substitué des glissières, surtout en Amérique).

La machine à balancier, malgré l'inutilité complète de cet organe, a duré un siècle environ avant d'être définitivement remplacée par la machine à *connexion directe*.

La *manivelle* peut être rapportée à l'une des extrémités de l'arbre, contre un des paliers, en *porte-à-faux*, ou bien comprise entre deux paliers ; l'arbre est alors *coudé*, ou à *vilebrequin*.

Il est cependant possible d'installer un tourillon en un point quelconque d'un arbre, sans le couder nécessairement : il suffit de lui donner un rayon assez grand pour qu'il enferme complètement l'arbre. Le tourillon s'appelle alors une *poulie d'excentrique ;* la tête de bielle qui l'en-

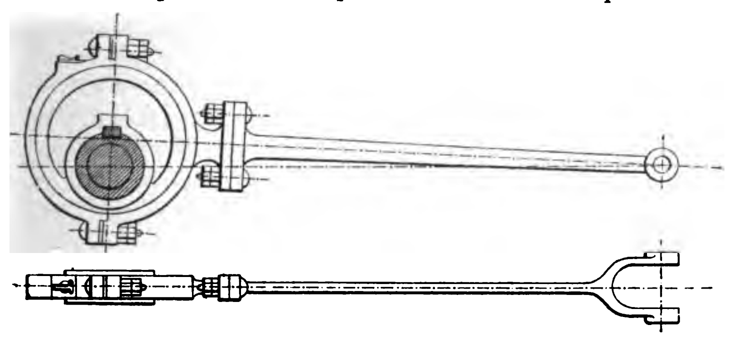


Fig. 13. — Excentrique. En coupe, les hachures montrent l'arbre de rayon r, sur lequel est calée la *poulie* d'excentrique, de rayon r'. Si R est le rayon d'excentricité, ou distance des deux centres, r' est un peu plus grand que $R + r$. La poulie est entourée par le *collier*, invariablement relié à la barre, terminée par une fourche sur laquelle s'articule une tige guidée en ligne droite.

toure est le *collier d'excentrique*, et la *barre* d'excentrique est le corps de bielle (fig. 13). La loi géométrique du mouvement n'est changée en rien par cette particularité de construction. Toutefois le grand rayon de l'excentrique est cause d'un frottement assez fort; et même, si on voulait employer l'excentrique à la transformation du mouvement rectiligne d'un piston moteur en mouvement circulaire, le frottement produirait des phénomènes de coincement ou arc-boutement dans une zone assez étendue, quelquefois même en tous les points, de sorte que la transmission serait impossible. Aussi n'emploie-t-on l'excentrique que

pour la transformation inverse, du mouvement circulaire en mouvement rectiligne, et pour la commande d'appareils annexes, qui ne demandent qu'une puissance restreinte.

Le bâti, qui porte les pièces mobiles de la machine, est fixé solidement à une fondation, c'est-à-dire à la masse même du sol, qui doit offrir une base absolument rigide. Les formes et dispositions des bâtis sont assez variées. Dans la machine horizontale, il s'étend en surface, l'axe du mouvement rectiligne, ou du cylindre, étant horizontal. Cet axe peut être vertical et la machine s'élève en hauteur, le bâti ayant une forme appropriée. Dans la machine verticale proprement dite, le cylindre est en dessous de l'arbre, placé à la partie supérieure du bâti. Mais la disposition inverse, dite *pilon*, est plus fréquente, le cylindre étant en haut du bâti, et l'arbre à la partie inférieure. Quelquefois l'axe du cylindre est *incliné*.

Généralement l'axe de l'arbre est horizontal; quelquefois il est vertical, ce qui entraîne l'horizontalité du cylindre.

Les machines qui se déplacent, locomobiles, locomotives, bateaux, ne sont pas fixées à une fondation, mais le bâti est un système rigide, portant les autres parties de l'appareil, telles que chaudière, roues, ou relié à l'ensemble de la construction, dans les bateaux.

Il peut y avoir deux ou plusieurs cylindres, portés par un même bâti, et dont les pistons attaquent un arbre unique. Chaque piston peut avoir sa bielle et sa manivelle, ou bien des pistons peuvent être montés *en tandem* sur une tige commune.

21. Distribution. — Des mécanismes *de distribution* sont nécessaires pour laisser la vapeur entrer dans le cylindre et en sortir aux instants convenables. Ces mécanismes se composent d'organes d'obturation, qui découvrent et referment les passages de vapeur, et des pièces qui les manœuvrent. Ils présentent une grande variété. On peut avoir une

idée générale du fonctionnement de la machine à vapeur, sans les connaître en détail : il suffit de savoir que pendant une certaine partie de la course du piston la vapeur à la pression supérieure a accès dans le cylindre, et qu'elle s'en échappe pendant une autre partie (principalement pendant la course *de retour*).

22. Mécanismes divers. — D'autres appareils sont fréquemment annexés aux machines à vapeur, régulateurs qui agissent sur l'admission de vapeur, pompes pour le service des condenseurs, pour l'alimentation des chaudières.

23. Principe des machines rotatives. — Dans les machines *rotatives*, la vapeur agit encore par sa pression, mais sur des pièces moins simples que le piston ordinaire. Ces pièces forment une sorte de chambre à capacité variable que remplit la vapeur. On peut néanmoins évaluer facilement le travail produit : par exemple, si la machine rotative reçoit 2 l de vapeur à une pression déterminée, la laisse détendre jusqu'au volume final de 10 l, puis expulse dans un condenseur ces 10 l de vapeur détendue, le travail est le même que dans un moteur à piston ordinaire dont le cylindre aurait une capacité utile de 10 l, avec admission de 2 l.

24. Action directe de la pression sur un liquide. — S'il s'agit de refouler un liquide, il n'est pas indispensable de recueillir le travail de la vapeur sur un piston, lequel commande un piston de pompe : la pression peut agir directement sur le liquide à refouler, contenu dans une chambre, qui n'a pas besoin d'être cylindrique ; chaque kg par cm^2 de pression effective de la vapeur peut élever l'eau à 10 m, sauf une certaine perte par frottements et autres actions secondaires. Mais une dépense supplémentaire de vapeur résulte de la condensation au contact de l'eau. L'appareil aspire en outre l'eau jusqu'à près de 10 m par l'effet du vide qui résulte de la condensation de la vapeur quand l'admission a cessé.

CHAPITRE IV

TRAVAIL DE LA VAPEUR

25. Indicateurs. — Un instrument simple, l'*indicateur*, permet de mesurer à chaque instant la pression qui agit sur le piston d'une machine ; on en déduit aisément le travail exercé par la vapeur. Cet instrument réalise le mode de représentation indiqué au § 16, à l'aide d'un *diagramme*, dont les abscisses (longueurs horizontales) figurent le volume occupé par la vapeur, et les ordonnées (hauteurs) la pression par centimètre carré. Les abscisses représentent aussi, si l'on veut, la course du piston, car la variation du volume est égale au produit du parcours du piston par la section du cylindre, qui est une quantité constante.

L'indicateur primitif de Watt est un petit cylindre vertical C (fig. 14) muni d'un piston F ; il communique, par sa partie inférieure, avec le cylindre où travaille la vapeur. Le dessus de ce petit piston est pressé par un ressort à boudin l, et un index en montre la position. La pression de la vapeur comprime plus ou moins le ressort : à chaque flexion du ressort correspond une charge connue, généralement proportionnelle à la flexion. Par conséquent, l'index montre à chaque instant la pression du fluide, qu'on peut lire sur une graduation convenable : l'appareil est un *manomètre*. Watt y ajouta une planchette verticale E qui suit le mouvement du piston, réduit dans un rapport convenable, et remplaça l'index par un crayon L traçant une courbe sur la planchette ; ce crayon inscrit la pression pour chaque position du piston. Bientôt la planchette fut remplacée par un barillet oscillant autour d'un axe vertical, sous l'action

d'une ficelle entraînée par le piston et d'un ressort de rappel antagoniste (fig. 15). Cette disposition, plus commode, ne modifie en rien le tracé.

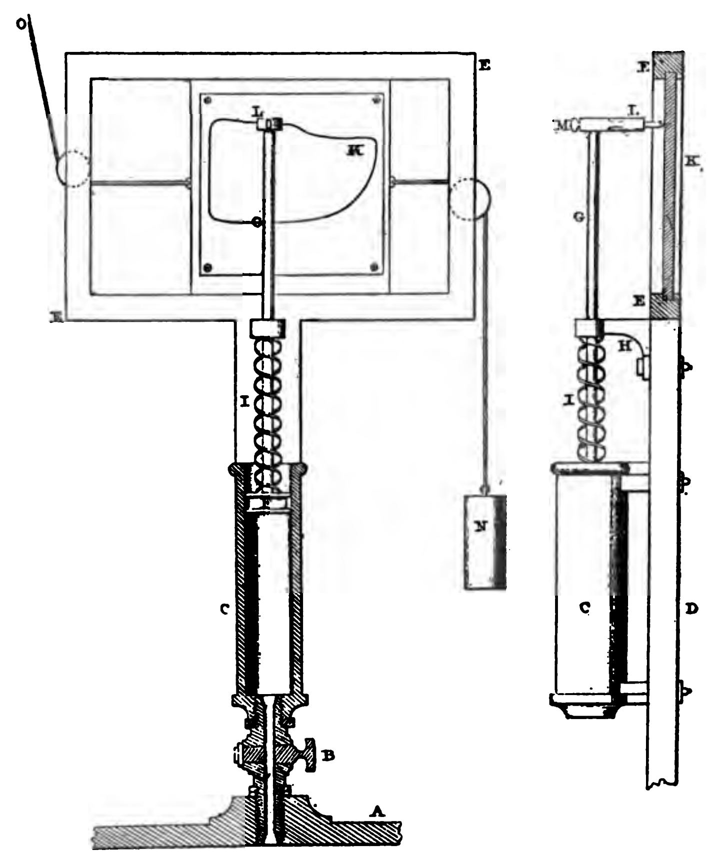


Fig. 14. — Indicateur de Watt, à planchette. L'appareil se monte sur le plateau A du cylindre vertical d'une machine à balancier.

Sur le diagramme, on trace la droite correspondant à la pression atmosphérique (fig. 16), en faisant mouvoir le barillet sans établir la communication avec le cylindre

moteur. La *tare du ressort* fait connaître la distance à laquelle on doit tracer l'axe des abscisses OV correspondant au vide absolu sous le piston de l'indicateur. On peut aussi mener les parallèles représentant des pressions de 1, 2, 3. . . kg par cm² au-dessus de la pression atmosphérique, lignes équidistantes quand les ressorts sont bien construits.

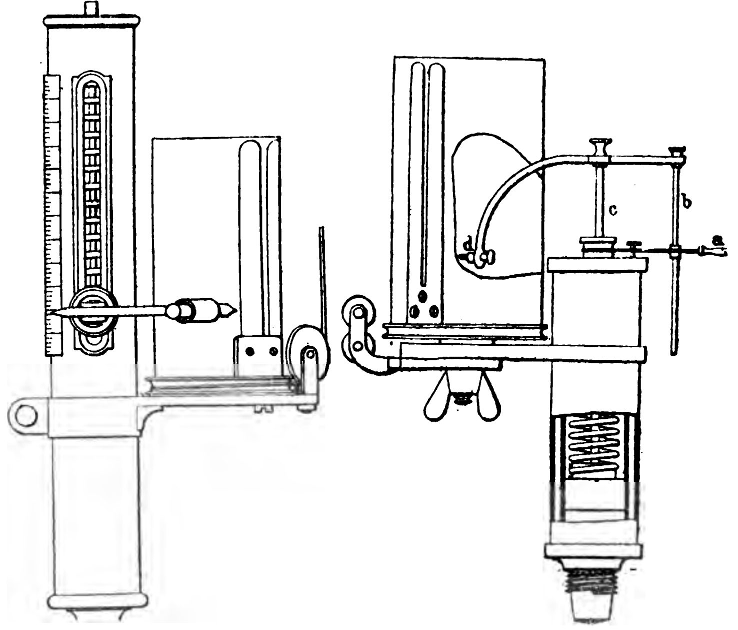


Fig. 15. — Indicateur à barillet d'Hopkinson (d'après le guide pour l'essai des machines de Buchetti).

La projection *ab* du diagramme sur OV est une longueur qui représente, à une échelle connue, le *volume* engendré par le piston dans sa course, ou la surface du piston multipliée par sa course ; pour étudier la détente du fluide dans la machine, on figure, à la même échelle, par O*a* l'*espace libre* que laisse le piston à fond de course, du côté correspondant au diagramme ; on trace en OP l'axe des ordonnées.

Quand les flexions du ressort sont exactement proportionnelles aux pressions, la surface du diagramme représente le travail exercé par la vapeur sur le piston, ou *travail indiqué,* toujours plus grand que le travail *effectif.* Le *planimètre,* dont on promène la pointe sur le contour du diagramme, en mesure directement la surface. Pour calculer le

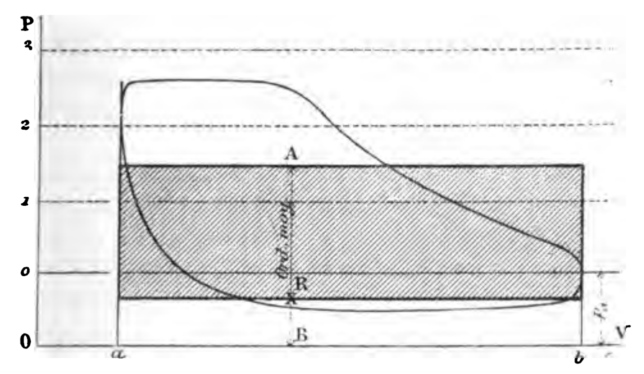


Fig. 16. — Diagramme d'indicateur. L'horizontale 0 correspond à la pression atmosphérique (p_a). AB, ordonnée moyenne pendant l'aller, de gauche à droite ; RB, ordonnée moyenne pendant le retour du piston ; AR, ordonnée moyenne pour la course aller et retour.

travail indiqué, on détermine ordinairement l'*ordonnee moyenne* du diagramme, c'est-à-dire la hauteur AR du rectangle ayant même surface (fig. 16) : cette ordonnée moyenne correspond à une pression constante qui produirait même travail sur le piston en le poussant pendant toute sa course motrice, sans qu'aucune résistance agisse pendant le retour. On peut dire aussi que l'ordonnée moyenne pour l'aller et le retour est la différence de deux ordonnées moyennes, AB pendant l'aller du piston et RB pendant le retour[1].

On relève et on mesure de même le diagramme sur

[1] Par exemple une ordonnée moyenne de 2 kg par cm^2, sur un piston de 500 mm de diamètre, dont la surface est de 1 963,5 cm^2, avec une course d'un mètre, donne un travail de 3 927 kg multipliés par 1 m ou 3 927 kgm.

l'autre face du piston des machines à double effet[1].

Plusieurs conditions sont nécessaires pour le fonctionnement précis de l'indicateur.

Une condition primordiale ne touche pas à l'instrument : la quantité qu'on veut mesurer doit être mesurable, ou la pression doit être la même, à chaque instant, dans les différentes parties de la masse de vapeur qui remplit le cylindre moteur. Cette égalité de pression paraît en général à peu près réalisée, au moins en exceptant les passages mêmes d'arrivée et de sortie, sur lesquels il ne conviendrait pas de brancher l'indicateur.

La pression, qui règne dans le cylindre moteur, doit se transmettre exactement et sans retard au piston de l'indicateur : il est bon que cet appareil soit monté sur le fond même du cylindre ; si un tuyau de communication est nécessaire, il doit être gros et court, et protégé contre le refroidissement par une enveloppe. Deux indicateurs, un sur chaque fond, valent mieux qu'un seul instrument mis en communication avec l'un ou l'autre bout du cylindre par un robinet à trois voies et de longs tuyaux.

Il importe que la position du barillet corresponde constamment à celle du piston moteur; la commande simple par ficelle, avec ressort de rappel, n'établit pas toujours exactement cette correspondance, quand la machine tourne vite.

[1] Sur l'autre face du piston, l'ordonnée moyenne sera, par exemple, de 1,9 kg par cm^2. La surface utile du piston, un peu moindre du côté de la tige, sera de 1 920 cm^2 : le travail pour une course sera donc de $1{,}9 \times 1\,920 \times 1$ ou 3 628 kgm. C'est au total par tour 7 555 kgm. Si la machine fait par minute 80 tours, elle produit pendant ce temps $7\,555 \times 80$ ou 604 400 kgm, et en moyenne par seconde 60 fois moins, ou 10 073 kgm, c'est-à-dire 135 chevaux. On obtient le même résultat un peu plus simplement en divisant 604 400 par 4 500, produit de 60 par 75. En général, on ne doit pas pousser cette division au-delà de trois chiffres significatifs, car les données ne sont jamais rigoureusement exactes, à cause des petites variations du régime de la machine et des imperfections des indicateurs. La règle à calcul convient parfaitement pour ces opérations, comme pour la plupart des calculs numériques relatifs aux machines.

Le piston d'indicateur devrait à chaque instant occuper la position d'équilibre, où la pression de la vapeur correspond exactement à la tension du ressort. Cette condition, à peu près réalisée pour les machines lentes, ne l'est plus avec les rotations rapides. C'est ainsi que l'indicateur primitif de Watt ne fonctionne pas bien pour des vitesses de plus de 50 à 60 tours par minute. Le piston de l'instrument, poussé, avec les pièces qu'il porte, par une force variable,

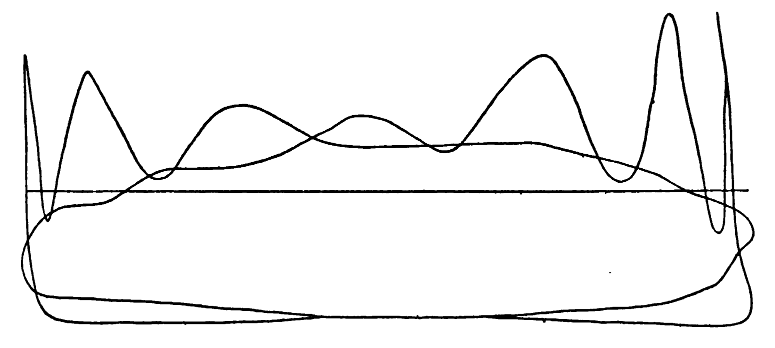


Fig. 17. — Effet du lancé du piston d'indicateur sur le tracé des diagrammes.

prend un mouvement tantôt accéléré, tantôt retardé, sans occuper constamment la position d'équilibre statique qui correspondrait à la pression de la vapeur. L'effet du *lancé* du piston, au début de la course, est très visible sur certains diagrammes d'indicateur (fig. 17). La plupart des modifications de l'appareil primitif ont été faites pour atténuer cet inconvénient grave.

Les indicateurs actuels ont des pistons plus petits et plus légers que l'appareil primitif de Watt, où le diamètre était de 40 mm environ. On en a, en outre, beaucoup réduit la course par l'emploi de ressorts très raides ; cette modification donnerait un diagramme trop aplati et peu lisible : à l'aide d'un mécanisme très léger, on amplifie le mouvement du crayon en proportion de la réduction de

la course du piston. Le bon fonctionnement de l'appareil paraît peu explicable à première vue, car si d'une part on réduit la longueur des oscillations gênantes, il semble que d'autre part on les amplifie d'autant. L'amélioration paraît tenir à ce que le ressort raide donne des oscillations beaucoup plus rapides, que le léger frottement de l'appareil et du crayon sur le papier éteint plus vite.



Fig. 18. — Diagramme avec décrochements montrant des frottements excessifs dans l'indicateur.

Il importe d'ailleurs que ces frottements soient toujours très faibles, sinon ils troublent complètement les inscriptions de l'appareil : un diagramme en escalier, avec des décrochements successifs du crayon, est la marque d'un frottement excessif (fig. 18).

Les services que rend l'indicateur sont multiples : il fournit les données nécessaires pour l'étude théorique des machines ; il mesure la puissance indiquée ; il montre comment se fait la distribution de la vapeur et met en évidence les défauts dans le réglage des organes distributeurs, défauts dont la correction peut amener une grande économie dans la dépense de vapeur, ou bien augmenter la puissance du moteur.

26. Dynamomètres. — L'indicateur fait connaître le travail, dit *indiqué*, exercé par la vapeur sur le piston d'un moteur; en divisant ce travail par sa durée, on calcule la *puissance indiquée* du moteur. Mais ce travail indiqué ne se retrouve pas tout entier sur l'arbre de la machine : il subit un déchet, parce que les frottements du mécanisme en consomment une fraction, parfois aussi à cause du travail nécessaire pour le fonctionnement de certains organes du moteur, tels que la pompe à air du condenseur.

Les *dynamomètres* mesurent la force transmise par un méca-

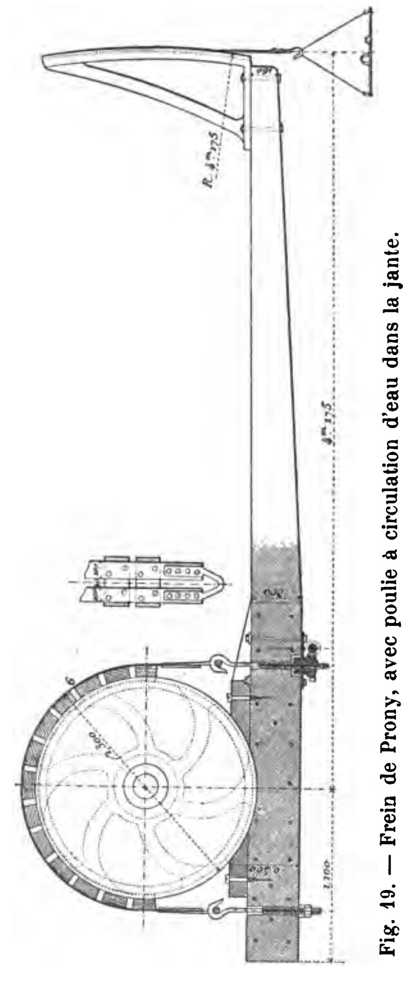
nisme ; en déterminant d'autre part le chemin parcouru par le point d'application, et la durée de l'opération, on peut calculer le *travail* de cette force et la *puissance* qu'elle donne. Les *dynamomètres d'absorption* dépensent le travail en frottements, tandis que les *dynamomètres de transmission* font connaître, par la flexion ou le déplacement de certaines pièces, la grandeur de la force qui les traverse. Lors des expériences, les premiers se substituent aux appareils commandés par un moteur, tandis que les seconds fonctionnent pendant la marche utile des machines.

Le type du dynamomètre d'absorption est le *frein de Prony* (fig. 19) : des sabots serrent une poulie, montée sur l'arbre de la machine, de manière à absorber tout le travail produit : un poids est suspendu à l'extrémité d'un levier, rattaché aux sabots, et ce levier doit rester horizontal ; l'appareil étant en équilibre, c'est le frottement des sabots qui maintient le levier horizontal, en soulevant le poids Q (exprimé en kilogrammes) à l'extrémité du levier long de L (en mètres). L'arbre faisant n tours par minute, le travail produit en une seconde, ou la puissance, est en chevaux $\frac{2\pi n}{60 \times 75}$ QL ou 0,0014 n QL. Ce calcul simple suppose le levier lui-même, indépendamment du poids Q, en équilibre sur l'axe de l'arbre.

L'appareil ne fonctionne que si le travail reste à peu près constant pendant quelque temps : autrement, on ne pourrait maintenir le levier horizontal. Le montage en est assez compliqué, et il ne peut guère s'appliquer qu'aux machines de petite ou de moyenne puissance.

Le frottement transforme le travail en chaleur, et il faut assurer le départ de cette chaleur, dès que la puissance absorbée est un peu grande ; parfois on emploie des poulies à circulation d'eau.

Les variantes du frein de Prony sont nombreuses. Au lieu de sabots en bois, on emploie, pour frotter sur la poulie, des bandes métalliques, des cordes et des sangles qui supportent un poids convenable. Le *frein à corde* (fig. 20) se compose



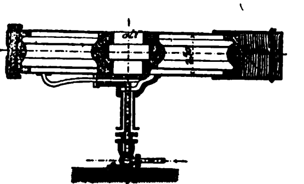


Fig. 19. — Frein de Prony, avec poulie à circulation d'eau dans la jante.

de cordes attachées à un point fixe, de préférence par l'intermédiaire d'un peson à ressort, et entourant une poulie ; elles portent un poids à leur extrémité libre : c'est un appareil très facile à installer sur les petits moteurs. Le travail que ce frein absorbe en une seconde est égal au produit du poids (diminué de la faible tension sur le point d'attache indiquée par le peson) par le chemin parcouru en une seconde par un point situé sur la circonférence de la poulie (ou mieux supposé sur l'axe de la corde).

Les dynamomètres de transmission s'interposent entre un moteur et l'arbre qu'il commande, ou sur une transmission quelconque.

Une disposition, qui d'ailleurs ne convient pas pour de grands efforts, consiste à effectuer la transmission à l'aide de deux poulies

contiguës, ayant même axe géométrique, et dont les faces voisines sont reliées, près de la jante, par un système de ressorts. Il en résulte un déplacement angulaire d'une poulie par rapport à l'autre; l'amplitude de l'angle donne la mesure de la force transmise, d'où on déduit le

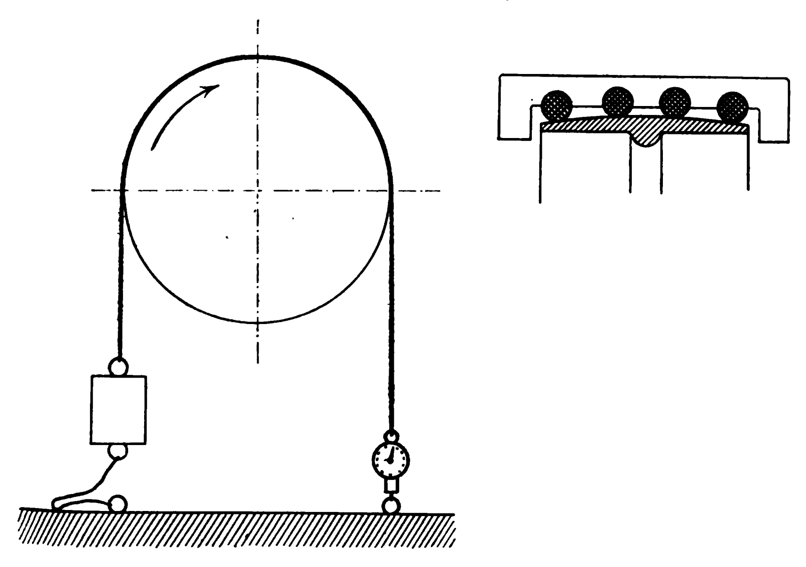


Fig. 20. — Frein à corde, monté sur la poulie d'un moteur; la corde est attachée à un peson à ressort, et porte à l'autre extrémité un poids, muni d'une attache de sûreté, pour en prévenir la projection accidentelle. Entretoise en bois pour maintenir les cordes séparées quand on en emploie plusieurs. Aux cordes on peut substituer une courroie.

travail et la puissance. Des mécanismes convenables permettent d'observer et d'enregistrer le déplacement angulaire relatif des deux poulies.

Une machine dynamo-électrique, dont on connaît le *rendement* avec précision, constitue un dynamomètre par la mesure de l'intensité et de la tension du courant qu'elle produit. Le courant peut être utilisé, ou absorbé dans un rhéostat.

27. Machines à un cylindre. — Le moteur à piston le plus simple n'a qu'un cylindre, dont le piston commande l'arbre par l'intermédiaire d'une bielle et d'une manivelle (fig. 21). La chaudière fournit la vapeur à une pression déterminée (habituellement comprise entre 5 et 10 kg par cm^2) ; la vapeur

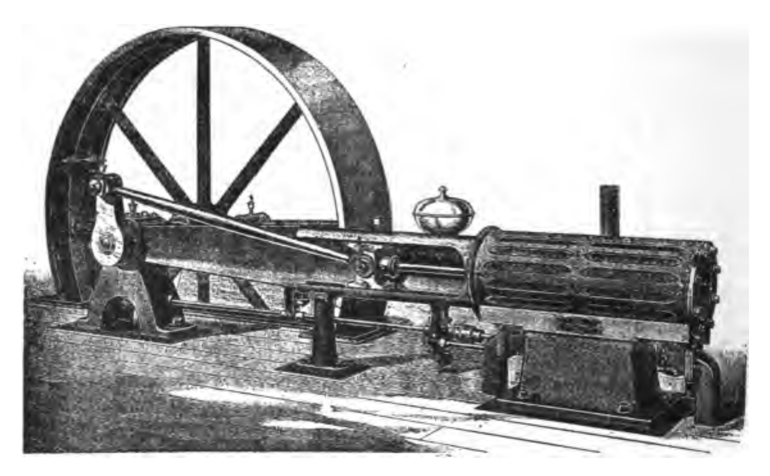


Fig. 21. — Machine horizontale à connexion directe, monocylindrique.

pousse le piston d'abord avec sa pleine pression, puis avec une pression décroissante, pendant la détente ; ensuite elle s'échappe dans un condenseur ou dans l'atmosphère, pendant le retour du piston. Cette action s'exerce de même sur les deux faces du piston dans les machines à *double effet*.

28. Cycle théorique de la machine monocylindrique. — Pour étudier méthodiquement l'action de la vapeur, on imagine une évolution simple, débarrassée de toutes les complications accessoires de la réalité, suivant ce qu'on appelle le *cycle théorique* de la machine à vapeur. On considère un seul côté du piston, qui, à son point de départ, ne laisse aucun *espace libre*, qui contiendrait de la vapeur ; il est supposé

poussé par la pleine pression, sans aucune réduction, pendant une première partie de sa course. La vapeur est saturée sèche. Ensuite la détente est assez prolongée pour qu'à la fin de la course la pression de la vapeur soit descendue jusqu'à la pression d'échappement (au condenseur ou dans l'atmosphère). Pendant toute la course de retour, la face considérée du piston est soumise à cette pression d'échappement, alors résistante. On admet en outre que, pendant toute cette évolution, la vapeur ne cède aucune quantité

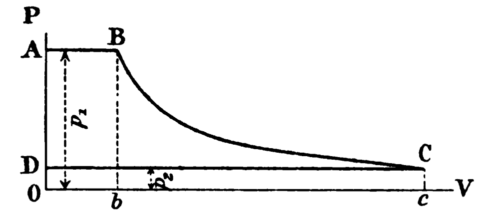


Fig. 22. — Diagramme du *cycle théorique* de la machine à vapeur.

de chaleur aux parois du cylindre qui l'enferment, et n'en reçoit aucune (dans cette hypothèse, la détente est dite *adiabatique*). Cette évolution est figurée par le diagramme ABCD (fig. 22), où Ob est le volume admis à la pleine pression p_1, BC la baisse de pression pendant la détente, avec augmentation du volume de O*b* à O*c*, et CD la contre-pression d'échappement p_2. Suivant la règle indiquée, la surface ABCD représente le travail produit par le volume de vapeur AB pris à la pression p_1.

Dans ces conditions idéales, étant données les valeurs de la pression initiale et de la pression finale, on peut calculer la quantité de travail que produirait une course aller et retour du piston, ainsi que le poids de vapeur qu'il recevrait de la chaudière : la règle de trois permet alors de passer au poids de vapeur nécessaire pour produire 270 000 kgm ou un cheval-heure. C'est la dépense de vapeur qu'exigerait la machine supposée parfaite, sans aucunes chutes de pression, avec détente complète, et sans échanges de chaleur avec les

parois. L'abaque reproduit figure 23 donne le nombre de kilogrammes de vapeur saturée sèche nécessaires pour produire le cheval-heure aux diverses pressions d'admission et

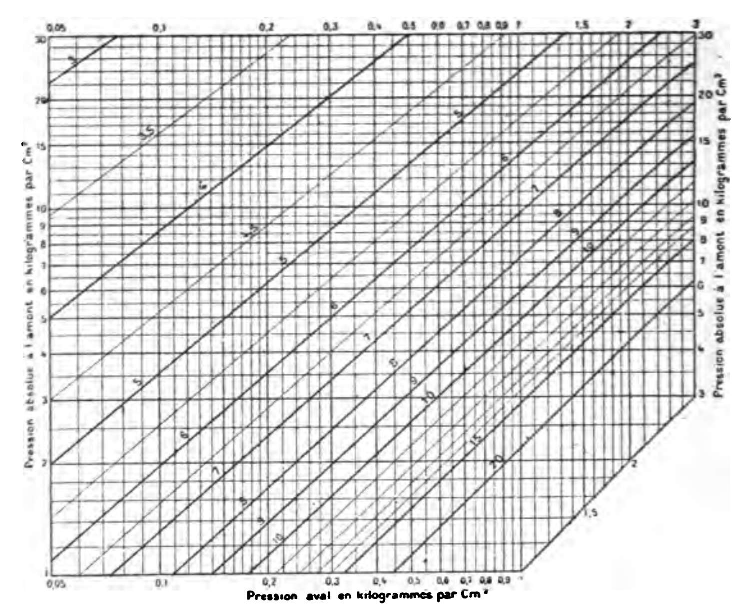


Fig. 23. — Abaque de M. Rateau, donnant la consommation des machines théoriques en kg de vapeur saturée sèche par cheval-heure. Pour trouver dans chaque cas cette consommation, on cherche le point qui correspond à la pression absolue dans la chaudière (pression d'amont) et à la pression absolue d'échappement (aval), par la rencontre d'une horizontale et d'une verticale. Si ce point tombe sur une des lignes obliques marquées d'un nombre, ce nombre est celui qu'on cherche. Si le point tombe entre deux lignes, il faut imaginer une ligne intermédiaire, correspondant à une consommation qu'on estime facilement.

d'échappement. Par exemple, on voit qu'avec des pressions absolues de 7,5 et de 1 kg par cm² (échappement dans l'atmosphère), la dépense serait de 7,8 kg ; avec des pressions de 10 et de 0,1 kg par cm² (condensation), la consommation se réduit à 3,8 kg.

Pour passer du poids de vapeur au nombre des calories que doit fournir la chaudière, il suffit de remarquer que le kg de vapeur, qui a travaillé dans la machine, se retrouve à l'état d'eau condensée, et, dans la machine théorique, précisément à la température qui correspond à la pression de la condensation. L'échappement à l'air libre peut être assimilé à une condensation sous la pression atmosphérique et à la température correspondante d'environ 100°. En pratique on arrive du reste à obtenir de l'eau presque à cette température, à l'aide de la vapeur d'échappement. Le kilogramme d'eau, à cette température connue dans chaque cas, est refoulé dans la chaudière, qui doit fournir les calories nécessaires pour chauffer l'eau jusqu'à la température de vaporisation, puis pour la vaporiser. On trouve dans les tables toutes les données nécessaires pour ce calcul[1].

Certaines machines sont alimentées avec la vapeur surchauffée. Le cycle théorique comprend la même série d'opérations, mais le poids de vapeur admis dans le cylindre à chaque course se trouve réduit du fait de la surchauffe, qui diminue la densité de la vapeur sous une pression déterminée. Le poids de vapeur par cheval-heure est moindre qu'avec la vapeur saturée, mais, pour apprécier l'économie du système, il faut tenir compte de la quantité de chaleur fournie, qui est plus forte par kilogramme de vapeur surchauffée. On trouve en définitive une petite économie de calories par l'emploi de la surchauffe[2].

[1] Par exemple, si l'eau est prise à 15° et vaporisée sous la pression absolue de 7,5 kg par cm², la chaleur du liquide (depuis 0°) est de 169 calories environ, d'où il faut déduire 15 à cause de la température initiale de 15°. Reste 154, auquel s'ajoute la chaleur de vaporisation, 488, soit au total 642 calories par kilogramme de vapeur ; comme il faut 7,8 kg de vapeur par cheval-heure pour une machine dont les pressions extrêmes sont 7,5 et 1 kg par cm², c'est une dépense de 642 × 7,8 ou 5 000 calories par cheval-heure.

[2] Il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit de la machine idéale définie un peu plus haut. Les avantages pratiques de la surchauffe tiennent principalement à une autre cause.

29. Causes de réduction du rendement. — La considération du cycle théorique apprend la dépense de vapeur que ferait une machine idéale substituée, avec les mêmes pressions d'admission et d'échappement, à une machine réelle, dont la consommation sera plus grande. Sous une autre forme, le poids de vapeur qui donnerait un cheval-heure dans la machine idéale ne donne en réalité qu'une moindre quantité de travail; la fraction de cheval-heure ainsi obtenue définit le *rendement* de la machine réelle comparée à la machine idéale.

Par exemple, si le cycle théorique exige une dépense de 6 kg de vapeur par cheval-heure, et si on constate que la machine réelle en dépense 10, cela veut dire que 6 kg, au lieu de produire un cheval-heure, n'en produisent que les 6 dixièmes : c'est un rendement de 60 p. 100.

Plusieurs causes se combinent pour réduire le travail que produit la vapeur : la détente est rarement poussée jusqu'à ce que la pression de la vapeur atteigne celle qui correspond à la température du condenseur; l'espace libre, laissé par le piston à fond de course, mérite souvent le nom d'espace *nuisible;* les parois métalliques des cylindres condensent la vapeur quand elle a une température élevée, et vaporisent l'eau condensée quand cette température baisse; la vapeur admise au cylindre n'est pas toujours sèche; elle *se lamine* et sa pression s'abaisse dans les différents passages qu'elle doit traverser; elle peut fuir autour des pistons et des organes de distribution; une portion de la chaleur est inutilement rayonnée à l'extérieur des appareils; enfin les frottements absorbent une partie du travail donné par la vapeur, et réduisent d'autant la puissance de la machine; la condensation et l'alimentation exigent aussi une dépense de travail. L'examen de ces diverses causes, qui réduisent le travail produit ou augmentent la dépense de vapeur pour un même travail, constitue la plus grande part de la théorie de la machine à vapeur. Les paragraphes qui suivent sont consacrés à cette étude, pour les moteurs à cylindre unique;

ensuite on verra quelles modifications entraîne l'emploi des cylindres en succession.

30. Détente incomplète. — Sauf lorsque la pression d'échappement est élevée, ce qui n'est nullement désirable en principe, il est pratiquement impossible de pousser la détente de la vapeur d'eau jusqu'à cette pression finale, parce qu'il faudrait agrandir démesurément le volume que lui offre dans

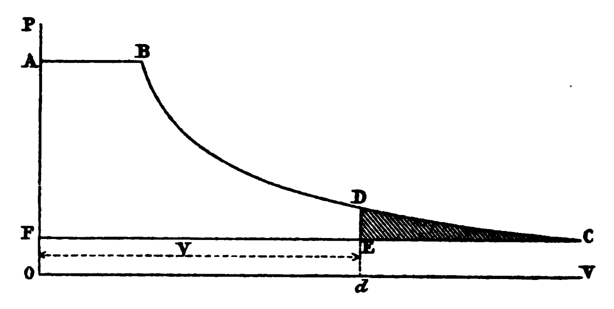


Fig. 24. — Diagramme de la perte de travail résultant d'une détente incomplète.

le cylindre le piston en se déplaçant. Le diagramme des pressions et volumes (fig. 24) montre clairement le travail théorique perdu par l'insuffisance du volume du cylindre. Aux faibles pressions réalisées dans les machines à condensation, la densité de la vapeur d'eau est minime ; elle occupe un très grand volume en n'exerçant qu'une très faible pression par centimètre carré[1]. L'échappement se produit quand la pression a encore la valeur représentée par l'ordonnée *d*D, et on perd le travail correspondant à la surface DCE.

31. Espace libre. — On doit arrêter le piston à quelque dis-

[1] Poids du m³ à 40° : 51 g : pression 74,7 g par cm².
» 30° : 30 g ; » 42,9 »
» 20° : 17 g ; » 23,6 »

tance du fond du cylindre, afin d'être sûr qu'il ne le frappera jamais, par suite de la déformation élastique des organes et du jeu des articulations, que l'usure augmente : cette distance est en outre assez largement calculée pour qu'une petite quantité d'eau ne risque pas de défoncer le cylindre.

Dans la machine réglée à neuf, le jeu du piston n'est pas également réparti entre les deux fonds de course, quand le rattrapage ultérieur de l'usure des coussinets de la bielle doit faire varier cette répartition. Il est souvent de 5 mm en moyenne, pour chaque côté, dans les machines fixes de dimensions ordinaires ; il s'élève parfois jusqu'à 10 mm dans les locomotives; enfin on atteint et on dépasse la cote de 15 mm dans les grandes machines marines.

L'espace libre comprend encore le volume des conduits de distribution depuis le cylindre jusqu'à l'organe d'obturation.

On définit habituellement la capacité de l'espace libre par une fraction du volume engendré par le piston dans sa course simple; les valeurs ne sont pas exactement les mêmes pour les deux côtés du piston. Quelquefois la valeur de chaque espace libre descend à 2 ou 3 p. 100 de ce volume, et même en dessous ; souvent elle s'élève à 8, 10, et même 15 p. 100.

Lorsque l'échappement, ou la communication avec le condenseur, dure pendant toute la course de retour du piston, comme dans l'évolution théorique, l'espace libre contient, en fin de course, la vapeur à la pression inférieure p_2 ; au début d'une course nouvelle, il doit être rempli de vapeur à la pression supérieure p_1. La consommation de vapeur à chaque coup de piston en est beaucoup augmentée, si l'espace libre est grand.

En même temps, le travail produit par coup de piston augmente : O*a* (fig. 25) représentant l'espace libre, à la même échelle que le volume engendré par le piston, et *ab* le volume de vapeur admis derrière le piston, à la pression p_1, ce n'est pas ce volume *ab* qui se détend pendant le reste de la course, mais le volume O*b*.

La courbe BC′ (en ponctué) que donnerait la détente du volume *ab* seul, devient BC.

L'augmentation de travail ainsi obtenue corespond à la détente du volume O*a* de vapeur, mais le travail qu'il pourrait donner par son admission à pleine pression est perdu ; en outre, l'interruption de la détente en D*d*, quand elle est incomplète au moment où le piston arrive à l'extrémité de sa course, vient réduire ce travail supplémentaire.

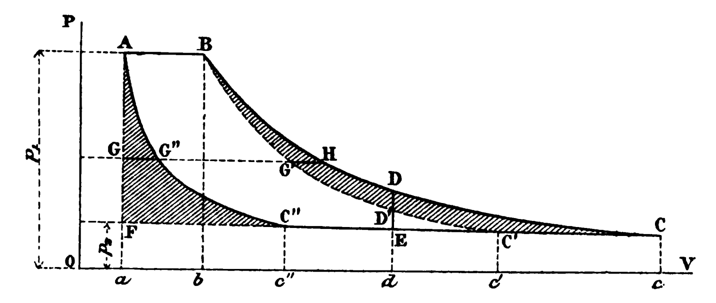


Fig. 25. — Effet de l'espace libre, et compression de la vapeur. Au commencement de la détente, le cylindre, avec l'espace libre O*a*, renferme le volume O*b* de vapeur, qui se détend, au lieu du volume *ab*. Dans certaines conditions hypothétiques, la compression de la vapeur d'échappement, suivant C″A, peut compenser l'effet nuisible de l'espace libre, le travail supplémentaire absorbé par cette compression (aire C″AF), étant égal à l'excédent BCC′ du travail de la détente.

Dans certains cas, lorsque la pression d'échappement est élevée, par exemple dans les machines sans condenseur, on peut éviter l'augmentation de dépense due à l'espace libre par la compression de la vapeur dans cet espace : on ferme l'ouverture d'échappement avant que le piston n'ait achevé sa course de retour, quand il passe par un point C″. La vapeur ainsi enfermée dans le cylindre est alors comprimée par le piston qui achève sa course ; elle est comprimée suivant C″A, de sorte qu'à la fin l'espace libre se trouve rempli de vapeur à la pression de la chaudière. Mais cet effet utile est compensé par le travail résistant sur le piston

absorbé par cette compression, de sorte qu'au point de vue de l'économie de vapeur, la compression n'est en général pas avantageuse. Il est bon de noter qu'elle a, d'autre part, l'avantage d'éviter l'application subite de la pleine pression sur le piston, qui fatigue les organes de la machine.

Avec une détente complète, suivant BC, et une compression C″A, le travail moteur supplémentaire dû à la vapeur de l'espace libre, travail représenté par la surface BCC′, est compensé exactement par le travail de compression C″AF, de sorte que le travail de la machine reste le même que dans la machine théorique sans espace libre (surface ABCC″A = surface ABC′FA). Mais cette conception suppose une machine idéale, qui s'écarte notablement des conditions complexes de la réalité.

Souvent la compression est incomplète; l'échappement se ferme quand le piston a dépassé le point C″ ; la pression de la vapeur comprimée est alors inférieure à celle de la chaudière, qui doit fournir la quantité nécessaire pour achever le remplissage de l'espace libre.

32. Action des parois. — L'évolution théorique simple qu'on imagine dans les machines suppose qu'il ne se fait aucun échange de chaleur entre la vapeur et les parois qui l'enferment, cylindre et piston. En réalité, d'importantes transmissions de chaleur se produisent entre la vapeur, plus ou moins mélangée d'eau, et les parois.

Au moment de l'admission, les parois métalliques du cylindre viennent d'être en contact avec la vapeur refroidie par l'échappement; ces parois, relativement froides, condensent une partie de la vapeur admise. Pendant la détente, la pression et par suite la température s'abaissent : une partie de l'eau condensée pendant l'admission peut alors se revaporiser, aux dépens de la chaleur déposée dans la paroi. Mais c'est surtout pendant l'échappement que cet effet se produit et que les parois se refroidissent.

L'observation des machines montre que le poids de la

vapeur consommée dépasse beaucoup celui qui correspondrait au volume apparent admis dans le cylindre : il n'est pas rare de trouver une dépense de 7 à 8 kg, quand en apparence elle ne devrait être que de 4 ou 5. S'il n'y a pas de fuites autour du piston ou des appareils de distribution, cette augmentation de dépense n'est explicable que par des condensations.

La revaporisation pendant la détente de l'eau condensée sur les parois a pour effet d'augmenter un peu la pression

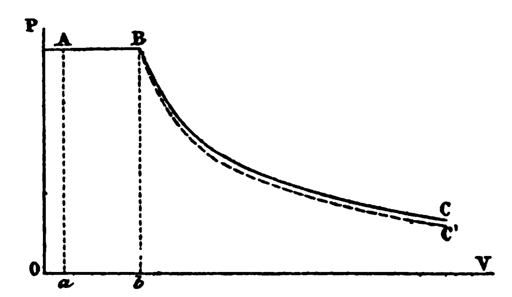


Fig. 26. — Détente adiabatique (courbe BC') et détente réelle (courbe BC).

de la vapeur, ou de relever la courbe de détente : au lieu de la courbe théorique BC', on observe, avec l'indicateur, la courbe BC (fig. 26). Rapportée aux axes OP et OV, cette courbe est telle que le produit pv de la pression p (ordonnée de la courbe) par le volume v (abscisse de la courbe) est constant aux divers points, à très peu de chose près : cette courbe est un arc de ce que les géomètres appellent *hyperbole équilatère :* le tracé par points en est facile[1].

On peut d'ailleurs observer directement les condensations

[1] On dit quelquefois que la vapeur obéit à la loi de Mariotte, parce que le produit pression-volume reste constant. Cette expression est vicieuse. La loi de Mariotte s'applique aux gaz, tels que l'air, pour lesquels le produit pression-volume est également constant, mais lorsque la température reste invariable. Dans la détente de la vapeur, au contraire, la température s'abaisse.

et les revaporisations qui se produisent sur le métal des cylindres, à l'aide du *révélateur de Donkin*, manchon en cristal qui communique avec l'intérieur du cylindre [1].

On a aussi observé la température dans l'épaisseur même du métal qui constitue les parois des cylindres : on a reconnu qu'à une très petite distance de la face en contact avec la vapeur, la température restait invariable et conservait une valeur supérieure à la moyenne arithmétique des températures extrêmes de la vapeur ; dans une couche de quelques millimètres seulement, la température varie périodiquement, comme celle de la vapeur, mais avec de moindres écarts.

Un autre fait intéressant est le peu d'activité des échanges quand le métal est sec et la vapeur sèche également : le nombre de calories transmises en une seconde par une surface donnée est alors relativement faible, malgré un écart assez grand entre les températures du métal et de la vapeur. Au contraire, la présence de l'eau active beaucoup les échanges.

La proportion de vapeur condensée pendant l'admission, dans une machine donnée, ne dépend pas seulement de l'écart entre les températures extrêmes que prend la vapeur dans le cylindre, mais surtout de l'écart entre les températures de la vapeur au commencement et à la fin de la détente. C'est ainsi que cette proportion condensée n'augmente pas beaucoup quand on substitue la condensation à l'échappement dans l'atmosphère, bien que la température inférieure de la vapeur passe alors de 100° à 40° ou 50°.

La proportion condensée à chaque coup de piston diminue quand la vitesse de la machine augmente : on admet qu'elle est à peu près proportionnelle à la racine carrée de la vitesse, c'est-à-dire qu'elle tomberait à moitié pour une vitesse quadruple.

Il y a intérêt à réduire autant qu'on le peut l'étendue des

[1] Voir la description de révélateur dans la *Revue de mécanique*, 2e sem. 1900, p. 635.

parois en contact avec la vapeur : les longs conduits des lumières des machines à tiroir ont l'inconvénient d'augmenter la surface de condensation.

On a quelquefois proposé de substituer à la fonte une substance moins conductrice de la chaleur, telle que le plomb ou la porcelaine, ce qui serait possible pour les fonds de cylindre et les faces de piston, surfaces sur lesquelles aucun frottement ne se produit. Ces applications ne paraissent jamais être entrées dans la pratique.

Il convient de remarquer que la partie cylindrique, sur laquelle frotte le piston, n'est pas placée dans les mêmes conditions que les fonds, au point de vue de l'action de la paroi, surtout dans sa région médiane. En effet, ces parois cylindriques sont alternativement en contact avec la vapeur qui agit sur les deux faces du piston, et, quand la détente est grande, la partie médiane n'est jamais en contact avec la vapeur à sa température la plus élevée.

33. Enveloppes de vapeur. — Watt avait entouré le cylindre de ses machines de vapeur prise à la chaudière ; l'utilité de cette enveloppe, bien établie aujourd'hui, a été souvent discutée. A considérer seulement le refroidissement extérieur, elle ne peut être que défavorable : constamment chauffée à la température de la chaudière, elle rayonne au dehors par une surface plus grande que celle du cylindre simple. Mais l'effet utile s'exerce vers l'intérieur, en modifiant beaucoup l'action des parois ; l'enveloppe leur donne une température plus élevée, et réduit ainsi l'activité des échanges avec la vapeur qui pousse le piston : la condensation à l'admission est moins abondante, et la proportion d'eau revaporisée pendant la détente est plus forte ; la dépense de vapeur est réduite, et le travail moteur s'en trouve augmenté.

Ces avantages se payent, il est vrai, par une dépense de vapeur dans l'enveloppe. Tout compte fait, l'expérience indique un bénéfice, c'est-à-dire une moindre dépense totale de vapeur, pour un même travail.

L'enveloppe s'étend autour de la surface cylindrique et, quand elle est complète, sur les fonds, qu'il importe surtout de chauffer. Elle est desservie de deux façons différentes, par une dérivation spéciale de vapeur prise à la chaudière, ou par la circulation de la vapeur même qui va travailler dans le cylindre. Pour qu'elle fonctionne bien, il faut que la vapeur y accède librement, qu'elle la remplisse entièrement, et qu'il ne s'y forme jamais de poches d'air ou d'eau, ce qu'on évite par un tracé convenable des passages.

Avec l'alimentation par une dérivation spéciale, l'écoulement de l'eau condensée s'obtient de diverses manières : quand la machine est voisine de la chaudière qui l'alimente, et placée à un niveau supérieur, un simple tuyau, aboutissant à la partie inférieure de la chaudière, y ramène l'eau de l'enveloppe. Le cylindre de certaines locomobiles et machines demi-fixes est monté sur la chaudière : il est alors facile de placer le cylindre dans la vapeur.

Parfois on renvoie à la chaudière l'eau condensée dans l'enveloppe au moyen d'une *pompe de purge* à piston plongeur, commandée par le moteur et marchant constamment : on donne, par exemple, à cette pompe des dimensions telles qu'elle aspire un volume un peu inférieur au 1 000e du volume engendré par le piston moteur.

Les robinets purgeurs, manœuvrés à la main ou automatiques, assèchent les enveloppes d'une façon moins satisfaisante : ces derniers sont souvent capricieux, et l'eau chaude de condensation est perdue au lieu de retourner à la chaudière.

Lorsqu'on fait circuler dans l'enveloppe la vapeur même avant son entrée dans le cylindre, elle entraîne l'eau condensée, et des dispositions spéciales ne sont plus nécessaires pour l'extraire ; la vapeur arrive dans le cylindre un peu plus humide, ce qui ne paraît pas avantageux. Cependant cette disposition est adoptée par d'habiles constructeurs. On peut d'ailleurs conserver les dispositifs qui sépa-

rent de la vapeur, au moins en partie, l'eau condensée dans l'enveloppe.

L'alimentation indépendante de l'enveloppe a des avantages d'ordre pratique parfois importants : elle permet d'échauffer la machine avant la mise en marche et de la maintenir chaude pendant les arrêts, de sorte qu'on évite au départ des condensations gênantes ou même dangereuses.

La proportion de vapeur condensée dans l'enveloppe varie beaucoup ; elle est souvent comprise entre le vingtième et le dixième de la quantité totale dépensée pour les machines monocylindriques.

La pression et par suite la température de la vapeur peuvent être plus élevées dans l'enveloppe que dans le cylindre, par exemple si elle est fortement détendue avant l'admission, et dans les machines à détentes successives. L'action de l'enveloppe est alors plus active, mais la dépense de vapeur y augmente. L'expérience semble indiquer qu'un excès notable de pression dans l'enveloppe n'est pas avantageux.

Inversement, le contact extérieur de la paroi avec la vapeur relativement froide, qui sort d'un cylindre, en abaisse la température, augmente le flux de chaleur qui la traverse, ainsi que l'importance des échanges à chaque coup de piston. Les conduits d'échappement contournent souvent le cylindre sur une certaine étendue et produisent cet effet : en traçant le dessin d'un cylindre, il convient d'éloigner ces conduits aussitôt qu'on le peut. Comme circonstance atténuante, ce contact se produit le plus souvent au milieu de la surface cylindrique, c'est-à-dire dans la région soumise intérieurement aux moindres variations de température, quand l'admission n'est pas très longue.

Un défaut du même ordre, mais plus grave, se voit dans certaines machines compound sans enveloppe, où l'on a complètement entouré le cylindre à haute pression de la vapeur qui s'en échappe, en disposant le réservoir inter-

médiaire autour de ce cylindre, dépourvu d'enveloppe[1].

En résumé, l'enveloppe, en chauffant la paroi du cylindre, diminue l'amplitude des oscillations de la température sur la face intérieure, ainsi que la profondeur de la couche soumise aux fluctuations. L'activité des échanges entre la vapeur et les parois est ainsi réduite ; grâce à l'enveloppe, le métal peut être à peu près sec à la fin de la détente, de sorte qu'il ne se refroidit presque plus pendant l'échappement.

Par contre, l'enveloppe de vapeur augmente la perte due au rayonnement extérieur ; le gain qu'elle procure en est réduit, mais sans être annulé : il n'est guère d'expériences qui n'indiquent une moindre consommation de vapeur pour un même travail quand on fait usage de l'enveloppe, du moins dans les machines bien réglées.

Les cylindres de dimensions modérées peuvent être fondus en une seule pièce avec leur enveloppe, bien que l'exécution de la pièce soit alors assez délicate. Dans les grands cylindres, on rapporte une *chemise* intérieure, qui laisse un vide de 30 mm environ formant l'enveloppe. Les plateaux des cylindres, à double fond, sont raccordés à l'enveloppe par des tuyaux.

34. Humidité et surchauffe de la vapeur. — La vapeur, en sortant d'une chaudière, peut entraîner un peu d'eau ; les condensations dans la tuyauterie, qui la conduit à la machine, la rendent plus humide. L'eau en abondance dans le cylindre risque d'en faire rompre le plateau ; on assèche la vapeur, en lui faisant parcourir des coudes brusques devant des poches qui reçoivent l'eau.

Malgré les précautions prises pour l'assécher, la vapeur est souvent humide à son entrée dans le cylindre, surtout quand elle a au préalable circulé dans l'enveloppe. La pré-

[1] Quand le cylindre, ainsi placé, est entouré d'une enveloppe, elle chauffe la vapeur du réservoir intermédiaire par sa paroi extérieure.

sence de l'eau dans la vapeur ne peut pas être avantageuse ; elle paraît augmenter l'importance des échanges de chaleur avec les parois.

Non seulement pour les études théoriques, mais aussi pour connaître la production des chaudières et la consommation des machines, il est utile de mesurer la proportion d'eau entraînée par la vapeur, car l'humidité de la vapeur augmente, en apparence, la production de la chaudière par kilogramme de combustible, puisqu'on compte comme eau vaporisée celle qui est simplement entraînée, tandis qu'elle exagère la dépense apparente de la machine.

La mesure de l'humidité de la vapeur, c'est-à-dire du poids d'eau contenu dans un kilogramme de vapeur humide, est assez difficile, d'abord parce qu'on n'est jamais sûr que l'échantillon prélevé représente bien la qualité moyenne de tout le courant de vapeur, puis parce que plusieurs des méthodes employées pour cette mesure sont défectueuses.

Un des appareils les plus commodes et les plus exacts, applicable seulement quand la proportion d'eau est faible, est le calorimètre *de Barrus* [1].

Au lieu d'être humide, la vapeur peut être surchauffée. Les *surchauffeurs*, tels qu'on les emploie aujourd'hui, élèvent la température de la vapeur de 50 à 80° au-dessus de celle qui correspond à la saturation. Exceptionnellement, on fait usage de températures de surchauffe beaucoup plus élevées (370° dans le moteur Schmidt). La vapeur ainsi surchauffée

[1] Lorsque la vapeur s'écoule en se *laminant* par un orifice étroit, elle s'assèche, puis se surchauffe, pourvu que la proportion initiale d'humidité soit assez petite. Ce principe est appliqué dans l'appareil Barrus : branché au point où on veut doser la vapeur, il laisse écouler un jet par un orifice étroit : après l'écoulement, la vapeur, qui a pris la pression atmosphérique, traverse un tuyau qui débouche librement au dehors ; un thermomètre, placé dans ce tuyau, mesure la température de la vapeur détendue ; quand elle est surchauffée, il indique une température θ, supérieure à la température θ_a qui correspond à la pression atmosphérique (soit 100° quand le baromètre marque 760 mm). Un manomètre mesure la pression initiale de la vapeur, p_1. En désignant par q_1, r_1, q_a, r_a, les chaleurs du

arrive sèche au cylindre, puisqu'un léger refroidissement extérieur n'amène pas de condensation. La surchauffe modifie le mode d'action des parois du cylindre et réduit notablement la consommation.

Lorsqu'on alimente un cylindre avec la vapeur modérément surchauffée, elle n'y reste pas surchauffée : elle est déjà saturée et même en partie condensée avant la fin de l'admission. On serait tenté de croire qu'on n'a presque rien gagné à la surchauffe ; mais en observant de plus près la marche de la machine, on remarque que pour un même travail, la consommation de vapeur diminue.

Cette économie tient à ce que la surchauffe mitige l'action des parois qui soutirent de la chaleur à la vapeur pendant l'admission, pour la restituer en partie pendant la détente, mais surtout pour l'envoyer se perdre au condenseur pendant l'échappement. Pendant l'admission, c'est en partie aux dépens de la chaleur de surchauffe que les parois se réchauffent, chaleur communiquée sans dépôt d'eau, dont un peu plus tard l'évaporation refroidira vivement le cylindre : en définitive, les échanges de chaleur sont moins actifs entre le fluide et les parois, qui prennent une température moyenne plus élevée.

La surchauffe agit donc un peu comme l'enveloppe de vapeur, mais avec une moindre dépense de chaleur. Son action s'exerce directement sur les parois mêmes qui produisent les échanges. La surchauffe réduit, d'ailleurs, l'uti-

liquide et de vaporisation (voir § 17) qui correspondent à la pression p_1 et à la pression atmosphérique, on calcule le titre x de la vapeur (c'est-à-dire la proportion de vapeur sèche dans un kilogramme de vapeur humide) par la formule :

$$q_1 + r_1 x = q_a + r_a + 0{,}48\ (\theta - \theta_a)$$

où 0,48 est le *coefficient de chaleur spécifique sous pression constante* de la vapeur surchauffée.

On trouvera la description de cet appareil, et d'autres servant à la même mesure, par M. Rateau, dans les *Annales des Mines*, 9e série, t. XI, p. 495.

lité de l'enveloppe, qui n'a plus qu'une moindre quantité d'eau à vaporiser sur les parois.

Bien qu'elle ait été employée avec succès vers 1850, on lui a reproché pendant longtemps de faire gripper les tiroirs et les pistons. L'emploi des huiles minérales pour le graissage diminue cet inconvénient. En outre, il n'y a guère que les distributeurs d'admission de vapeur qui soient exposés à des températures très élevées, et les soupapes, employées dans certains moteurs, résistent bien à ces températures.

35. Laminage. — Lorsque la vapeur, pour entrer dans un cylindre, traverse rapidement des orifices étroits, elle ne conserve pas la même pression que dans la chaudière ; il se produit alors une chute de pression, qu'on appelle *laminage de la vapeur*. Le laminage peut aussi se produire à la sortie même de la chaudière, si l'ouverture de la prise de vapeur est étroite, et en d'autres passages.

Pendant ce laminage de la vapeur, elle ne donne pas le travail mécanique qu'elle pourrait produire par sa détente, en passant de la pression initiale à la pression réduite ; il en résulte qu'elle conserve les calories qui se seraient changées en travail dans cette détente. Aussi, après le laminage, la proportion d'eau que contient la vapeur humide se trouve légèrement réduite ; si elle est tout à fait sèche au début, elle se surchauffe (on a vu un peu plus haut l'application de cette loi dans le calorimètre Barrus).

Il ne faut pas oublier le sens précis du mot *surchauffe*, tel qu'il a été défini : il n'indique pas que la température augmente, car au contraire elle s'abaisse pendant l'écoulement, mais il signifie qu'à la pression considérée le volume de la vapeur est plus grand que celui qu'occuperait la vapeur saturée sèche ; la température en est un peu plus élevée [1].

[1] Par exemple, si les pressions de part et d'autre de l'orifice d'écoulement sont de 10 et de 5 kg par cm², un mélange de 983 g de vapeur et de 17 g d'eau donne, après l'écoulement, un kg de vapeur saturée sèche. Le passage de la température de 200° à 150°,

La distribution par un tiroir à fermeture progressive donne lieu à un laminage, souvent assez fort à la fin de l'admission, marqué sur le diagramme d'indicateur par un trait tel que AB (fig. 27). Une distribution sans laminage donnerait l'admission AB′ à pression constante. Le laminage ne fait pas perdre le travail représenté par la surface AB′B : pour en apprécier justement l'effet, il faut imaginer une

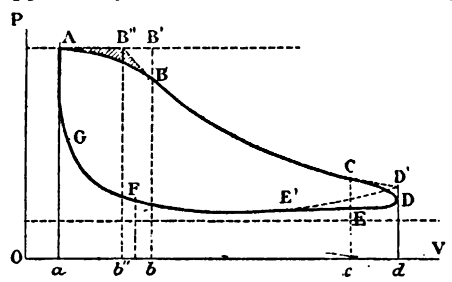


Fig. 27. — Diagramme avec laminage de vapeur à l'admission (AB) et à l'échappement (CDEF).

admission à pleine pression AB″, telle que la courbe de détente, partant de B″, vienne passer par le point B. Le travail perdu par suite du laminage est représenté par l'aire AB″B. On peut même dire qu'en principe le laminage doit réduire un peu la consommation de vapeur, par suite de la vaporisation de l'eau ou de la surchauffe qu'il produit ; en réalité cet effet est faible.

Au moment où s'ouvre l'orifice d'échappement, la pression peut surpasser beaucoup celle du condenseur, par suite de l'insuffisance de la détente, et la vidange du cylindre exige alors un certain temps.

Pour éviter un travail résistant sur le piston dû à une

ou de la pression de 15kg,89 par cm² à 4kg,77, assèche le mélange de 970 g de vapeur avec 30 g d'eau. Un kilogramme de vapeur sèche, sous la pression de 10 kg par cm², ou à la température de 178°,9, donnera sous la pression de 5 kg par cm², de la vapeur surchauffée à 169°, tandis que la température de la vapeur saturée est, sous cette pression, 151°.

contrepression trop forte, telle que D'E' (fig. 27), au début de la course de retour, on ouvre souvent l'orifice d'échappement avant la fin de cette course : la pression s'abaisse suivant une courbe telle que CDE; on profite ainsi de la marche relativement lente du piston de part et d'autre du fond de course.

La pression, une fois abaissée dans le cylindre jusqu'à une valeur un peu supérieure à la pression du condenseur, reste à peu près constante pendant une partie de la période d'échappement; puis la fermeture progressive de l'orifice d'échappement commence à la relever avant la fermeture complète; la compression de la vapeur en est un peu augmentée. Enfin l'ouverture anticipée de l'orifice d'admission ramène graduellement la pression jusqu'à celle de l'admission, suivant GA.

36. Fuites. — Les fuites de vapeur augmentent évidemment la consommation; en général, il est aisé de faire disparaître ou de réduire beaucoup les fuites visibles vers l'extérieur; mais il est difficile d'apprécier celles qui se produisent à l'intérieur de la machine, à moins qu'elles ne soient fort abondantes. C'est autour des pistons et des organes de distribution que la vapeur peut fuir. L'action des parois est comparable à une fuite importante de vapeur depuis la chaudière jusqu'au condenseur; dans les recherches expérimentales, le poids de la vapeur qui fuit effectivement s'ajoute au poids condensé et revaporisé dans le cylindre.

Quelquefois des fuites intérieures existent par suite de défauts dans la fonte des cylindres ou dans l'assemblage des enveloppes de vapeur.

Autour d'une soupape de prise de vapeur, une fuite est dangereuse, parce qu'elle peut causer une marche intempestive de la machine.

37. Pertes de chaleur. — On ne peut empêcher la chaleur

de se dissiper autour des machines, et il en résulte une perte assez importante. Malgré l'action salutaire des revêtements isolants (§ 123), les conduites, les cylindres et leurs boîtes à vapeur dégagent constamment des calories.

Par exemple, la surface extérieure du cylindre et de la tuyauterie d'une machine Corliss, qui dépense 1 000 kg de vapeur à l'heure, est de 12 m²; le métal est en contact à l'intérieur avec la vapeur à 165° qui enveloppe le cylindre moteur. Sans revêtement isolant, on condenserait par heure, 40 kg de vapeur, perdant ainsi 20 000 calories. Le revêtement isolant réduit cette quantité à 20 kg environ.

Le voisinage des passages de vapeur, pour l'admission et pour l'échappement, entraîne encore une perte de chaleur. Souvent une mince paroi de fonte sépare la boîte à vapeur du conduit qui débouche dans le condenseur : un flux incessant de chaleur se perd en traversant cette paroi.

38. Transformation du travail indiqué. — Le travail de la vapeur sur le piston, ou *travail indiqué* de la machine, n'est pas recueilli en totalité, car les frottements du moteur en consomment une part. Le *travail effectif*, que mesure un frein de Prony sur l'arbre d'un moteur, est réduit d'autant.

Les principales pièces frottantes sont les pistons contre les cylindres, les tiges dans leurs garnitures, les têtes de piston sur les glissières, les grosses têtes de bielles motrices autour des tourillons moteurs, les fusées de l'arbre dans les paliers. Il faut y ajouter les mécanismes de distribution : le tiroir ordinaire, non équilibré, absorbe un travail important en frottant sur sa table. En outre, les pompes du condenseur et les pompes alimentaires viennent prendre leur part du travail indiqué.

On peut prévoir le travail absorbé par les frottements d'une machine, en calculant les forces qui appuient l'une contre l'autre les pièces frottantes. La loi du mouvement de ces pièces est connue; il est vrai que les coefficients de

frottement sont souvent incertains et qu'ils varient suivant le graissage.

Le frottement des pistons et des tiges dépend aussi du serrage de leurs garnitures. En prenant les valeurs extrêmes des coefficients, on détermine deux limites de la puissance absorbée par les résistances passives. Mais ces prévisions sont rarement exactes, et, lorsqu'on ne peut pas installer à la fois un indicateur et un frein de Prony sur une machine, on ne sait guère quelle fraction de la puissance indiquée elle rend.

Lorsqu'on fait varier la puissance effective produite, en modifiant les conditions du travail de la vapeur, et en conservant la même vitesse de marche, il est probable que la puissance consommée en frottements diminue légèrement quand la puissance produite est moindre. Lorsque la puissance effective devient nulle, la machine tourne *à vide,* et la puissance indiquée est entièrement absorbée par les résistances passives. On la mesure alors aisément avec l'indicateur.

On peut admettre que les machines à vapeur en bon état rendent en puissance effective de 80 à 90 p. 100 de la puissance indiquée. Dans certains cas, le rendement est supérieur, ou plus faible.

Assez forts dans les machines neuves, les frottements s'atténuent quand la marche a rodé les surfaces frottantes.

39. Dimensions des cylindres. — La puissance fournie par un même cylindre peut varier beaucoup ; elle dépend de la pression de la vapeur qu'il reçoit, de la contre-pression à l'échappement, du degré de détente, et, plus généralement, des diverses circonstances de la distribution ; elle change avec la vitesse de rotation de la machine. Pour déterminer les dimensions qu'on donnera à un cylindre auquel on demande une certaine puissance, on fixe au préalable ces diverses conditions de marche. Il faut alors prévoir le dia-

gramme du travail de la vapeur. Une fois ce diagramme tracé, on en mesure l'ordonnée moyenne, ou la pression moyenne qui pousse constamment le piston : on en déduit le volume du cylindre donnant le travail demandé à chaque tour.

Cette méthode détermine seulement le produit de la surface du piston par la course, et on peut choisir arbitrairement, ou plutôt d'après d'autres considérations, l'une de ces dimensions. A égalité de volume engendré par le piston, deux cylindres sont équivalents, qu'ils aient un grand diamètre avec une faible course, ou un petit diamètre avec une longue course, sous réserve des différences secondaires dans le travail qui résultent de la variation des espaces libres et de l'action des parois.

En réalité, c'est un travail effectif qu'on demande à la machine, tandis qu'on déduit du diagramme le travail indiqué, qui surpasse le travail effectif dans une proportion calculée d'après les analogies connues.

Le tracé approximatif du diagramme n'est pas bien difficile, en tenant compte dans chaque cas des détails de la distribution et des laminages, à l'admission et à l'échappement, qui résultent de la section des passages et de la vitesse de la machine.

Une formule simple (dite de *Poncelet* et *Morin*) permet de calculer approximativement l'ordonnée moyenne du diagramme. On suppose d'abord un diagramme tel que ABDEF (fig. 28), où la courbe de détente, BD, est une hyperbole équilatère[1].

L'ordonnée moyenne se calcule alors par la formule $kp_1 - p_2$, p_1 et p_2 étant les pressions d'admission et d'échappement et le coefficient k dépendant du *degré d'admission*, c'est-à-dire du rapport de AB et de FE (fraction de la course pendant laquelle a lieu l'admission).

[1] Courbe telle que le produit de l'abscisse O*b* par l'ordonnée *b*B est constant.

Le tableau qui suit donne les valeurs de ce coefficient k pour divers degrés d'admission :

Degrés d'admission.	Valeurs correspondantes du coefficient k.
1	1
0,9	0,995
0,8	0,979
0,7	0,950
0,6	0,908
0,5	0,847
0,4	0,767
0.35	0,717
0,30	0,663
0,25	0,597
0,20	0,522
0,18	0,489
0,15	0.435
0,14	0,415
0,13	0,396
0,1	0,303

Fig. 28. — Diagramme de la formule de Poncelet et Morin, montrant le tracé d'un point quelconque de l'hyperbole BD, à l'aide d'un vecteur mené de O et coupant l'ordonnée bB.

Le diagramme réel aura une moindre surface que le diagramme hypothétique ABDEF, surtout dans les machines qui fonctionnent avec laminages et compression. On doit donc appliquer dans chaque cas un coefficient de réduction à l'ordonnée moyenne calculée comme il vient d'être dit. Parfois on adopte la valeur assez forte 0,7.

Une nouvelle réduction est nécessaire pour passer du travail indiqué au travail effectif[1].

[1] Par exemple, on veut développer 100 chevaux, avec une admission au cinquième et des pressions extrêmes de 6 et 0,2 kg par cm², dans le cylindre unique d'un moteur à double effet, faisant 80 tours par minute. Un coup simple de piston doit produire $\frac{75 \times 100 \times 60}{2 \times 80}$ ou environ 2 800 kgm effectifs, et $\frac{2800}{0.85}$ ou 3 300 kgm indiqués, en admettant que le travail effectif soit les 85 centièmes du travail indiqué. Le diagramme de Poncelet doit correspondre à $\frac{3\,300}{0,7}$ ou à 4 700 kgm. Or l'ordonnée moyenne de ce diagramme est de $6 \times 0.522 - 0,2$ ou 2,94 kg par cm². La surface du piston, en centimètres carrés, multipliée par la course, en mètres, est donc égale à $\frac{4\,700}{2,94}$ ou 1 600. Avec un diamètre de 500 mm, la course sera de 815 mm.

La vitesse restant la même, on augmente ou on diminue la puissance en accroissant ou en réduisant la longueur AB de l'admission.

40. Machines compound. — La machine compound se compose essentiellement de deux cylindres successifs de dimensions différentes, séparés par un réservoir intermédiaire ; le premier s'appelle cylindre à haute pression, ou admetteur, ou petit cylindre ; le second est le cylindre à basse pression, ou détendeur, ou grand cylindre. L'évolution théorique de la vapeur est la suivante : un volume AB de vapeur (fig. 29) à la pression p_1 de la chaudière, est admis dans le petit cylindre, dont elle pousse le piston ; puis la vapeur se détend suivant BC pendant le reste de la course de ce piston. Elle est alors à une pression p'_1, qui est celle du réservoir intermédiaire ; pendant le retour du piston, cette vapeur à la pression p'_1 s'échappe dans ce réservoir, la contre-pression sur le piston étant figurée par CD.

D'autre part, le réservoir fournit au grand cylindre, pendant l'admission, un même volume DC de vapeur à la pression p'_1 ; pendant la détente, suivant CE, cette vapeur pousse le piston jusqu'au bout de sa course.

En général, le volume du second cylindre ne pourra pas être assez grand pour que la détente soit complète jusqu'à la pression du condenseur, p_2 : on aura donc chute de pression EF à l'échappement du grand cylindre, puis contre-pression FG pendant le retour du piston.

En définitive, la surface du diagramme total ABEFG est partagée en deux parties : l'une, ABCD, figure le travail accompli par la vapeur dans le premier cylindre, l'autre, DCEFG, le travail dans le second. Les volumes des deux cylindres sont représentés par les longueurs DC et GF. Habituellement, les courses des deux pistons étant les mêmes, les surfaces des pistons sont proportionnelles à DC et à GF.

Si le volume admis dans le grand cylindre était plus grand

que DC, et égal à D'C', la pression p'_1 du réservoir serait plus faible : le petit cylindre fournirait un travail plus fort ABCKD'; le grand cylindre ne donnerait que D'C'EFG et le total serait moindre que la surface du diagramme primitif, d'une quantité CKC'.

Ce premier aperçu ferait juger la machine compound inférieure à la machine monocylindrique : l'examen des

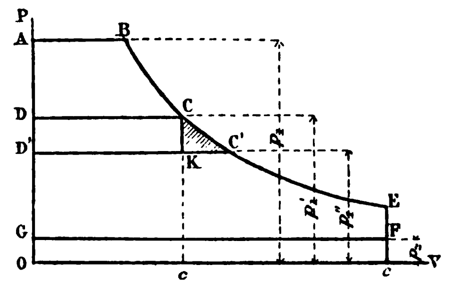


Fig. 29. — Diagramme théorique du travail dans les deux cylindres d'une machine compound. Travail de la vapeur dans le petit cylindre, ABCD ou ABCKD'; travail dans le grand cylindre, DCEFG ou D'C'EFG; perte triangulaire, CC'K.

diverses conditions réelles de l'évolution de la vapeur, dans la compound, montre une série de circonstances, favorables ou non, dont la résultante est en général avantageuse. Dans cette comparaison, la machine monocylindrique équivalente a un cylindre égal au grand cylindre de la compound.

En ce qui touche la détente, elle reste incomplète, quand la pression d'échappement p_2 est basse, aussi bien avec la compound qu'avec la machine monocylindrique, puisqu'elle est forcément limitée au volume du dernier cylindre. Elle est incomplète aussi dans le premier cylindre de la compound, lorsque le diagramme se rapproche de ABCKD' (fig. 29), donnant lieu à la *perte triangulaire* CKC'.

L'effet des espaces libres des cylindres se trouve atténué par la disposition de la compound, comparée à la machine réduite au grand cylindre seul : MA et M'A' (fig. 30) représentent ces deux espaces libres; s'il n'y avait aucune com-

pression de la vapeur, la chaudière devrait remplir l'espace libre du petit cylindre, MA, plus petit que M'A', et déjà occupé par la vapeur à la pression p_1' du réservoir; d'autre part cette vapeur du réservoir devrait remplir l'espace libre M'A', du grand cylindre. Dans la machine monocylindrique, c'est la vapeur à la pression p_1 de la chaudière qui remplit M'A' ou MA'' : la quantité de vapeur ainsi dépensée est plus grande.

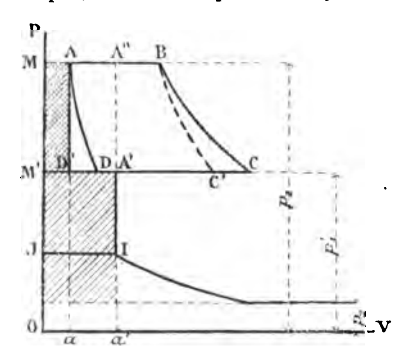


Fig. 30. — Compression dans les espaces libres des deux cylindres d'une machine compound.

En outre, le petit cylindre de la compound se prête à une compression complète, vu la valeur élevée de la pression d'échappement, p'_1 : on peut dans ce cylindre s'approcher du diagramme ABCD, qui compense l'effet de l'espace libre.

Dans le grand cylindre, la compression relève la pression jusqu'à une valeur telle que OJ, qui s'approche plus de la pression p_1' que de la pression p_1 : le poids de la vapeur, prise au réservoir pour remplir cet espace libre, se trouve ainsi réduit.

La disposition compound paraît atténuer notablement l'action des parois. En désignant par θ_1, θ_1' et θ_2 les températures de la vapeur saturée aux pressions p_1, p_1' et p_2, la température du fluide oscille entre θ_1 et θ_1' dans le petit cylindre, entre θ_1' et θ_2 dans le grand, tandis qu'elle oscillerait entre θ_1 et θ_2 dans le grand cylindre seul. Cette réduction des écarts de température diminue la condensation de la vapeur de la chaudière dans le petit cylindre, qui, en outre, présente des parois moins étendues que la machine monocylindrique; la vapeur ainsi condensée se revaporise pen-

dant la détente et pendant l'échappement au réservoir. Dans le réservoir, s'il est bien enveloppé, il ne se produit guère de condensation. C'est en pénétrant dans le grand cylindre qu'une nouvelle condensation se fait sur les parois; l'eau condensée se vaporise pendant la détente et l'échappement final.

Si on considère, au lieu de la variation totale de température, celle du commencement à la fin de la détente, qui joue un rôle important dans ces phénomènes, la machine compound est également avantageuse.

Une partie de la vapeur se condense successivement deux fois : les poids ainsi condensés dans les deux cylindres peuvent être voisins l'un de l'autre, mais ne sont pas nécessairement égaux.

Les enveloppes de vapeur s'appliquent aux machines compound, qui se prêtent à des combinaisons assez variées. Le cylindre à haute pression se trouve enveloppé, comme celui d'une machine monocylindrique, par la vapeur à la pression d'admission, parfois par la vapeur même qui va y pénétrer. Le cylindre à basse pression peut être enveloppé de même par la vapeur à la pression de la chaudière : on obtient ainsi une enveloppe très active, mais consommant une assez forte proportion de vapeur quand la pression initiale est élevée. Diverses expériences pratiques de consommation semblent indiquer que cette disposition n'est pas toujours la plus avantageuse, et qu'il vaut mieux alimenter l'enveloppe du grand cylindre par la vapeur détendue jusqu'à une pression voisine de celle du réservoir.

Le réservoir peut aussi être réchauffé par une enveloppe et même par un faisceau tubulaire, où circule la vapeur de la chaudière : la vapeur y est alors séchée et même légèrement surchauffée. Cette disposition est séduisante, car en prenant à la chaudière une quantité de chaleur relativement faible, on améliore notablement la qualité de la vapeur dans le réservoir.

Néanmoins, les expériences pratiques de consommation

ne sont pas toutes favorables à ce réchauffage du réservoir, qui, parfois, augmente la dépense totale de vapeur. L'enveloppe du réservoir peut toutefois être justifiée par l'augmentation de puissance qu'elle donne[1].

La surchauffe s'applique avec avantage aux machines compound : elle permet de réduire beaucoup les condensations dans le petit cylindre et d'en supprimer l'enveloppe sans inconvénient. L'évolution subséquente dans le grand cylindre est aussi améliorée.

La disposition compound augmente la perte de travail causée par le laminage, puisque la vapeur est laminée à l'admission et à l'échappement de chacun des deux cylindres successifs. Par contre, l'effet des fuites intérieures est moindre, la chute totale de pression étant partagée en deux par le réservoir intermédiaire.

La disposition compound augmente la surface extérieure des appareils; une machine monocylindrique se réduit au cylindre à basse pression seul de la compound équivalente. Toutefois, si l'enveloppe de ce cylindre n'est pas chauffée

[1] Par exemple, des expériences de M. Witz, sur une machine compound construite par Dujardin, ont donné les nombres qui suivent. Les deux cylindres ont pour diamètres 660 et 1 150 mm, avec une course de 1 350 mm; le nombre de tours par minute est 64; les pressions extrêmes sont 6 kg et 0,13 kg par cm^2 en moyenne; la puissance indiquée varie de 540 à 560 chevaux. Les consommations moyennes de vapeur, pour 270 000 kgm indiqués (ou par cheval-heure) ont été d'environ :

6,5 kg quand aucune enveloppe n'était chauffée;
6,1 avec les enveloppes des cylindres et du réservoir chauffées;
6,0 avec les enveloppes des deux cylindres chauffées.

La vapeur des enveloppes avait la pression de la chaudière.

Les proportions (en poids) de vapeur condensée dans les enveloppes, par rapport à la consommation totale, étaient, dans la seconde expérience :

1,75 p. 100 dans l'enveloppe du petit cylindre:
2,12 — — — — grand —
8,32 — — — du réservoir.

Dans la troisième expérience, on a condensé :

1,75 p. 100 dans l'enveloppe du petit cylindre;
3,56 — — — grand —

directement par la vapeur de la chaudière, la température intérieure se trouve réduite dans le grand cylindre, ce qui établit une certaine compensation entre les quantités de chaleur perdues extérieurement par les deux machines.

Des raisonnements analogues s'appliquent à la transformation du travail indiqué en travail effectif : la multiplicité des organes de la compound semble augmenter les résistances passives, mais la réduction des pressions diminue le frottement de la plupart de ces organes. En général, le déchet, de ce chef, sera un peu plus fort dans la compound. Il n'en est pas de même si l'on est conduit à doubler la machine monocylindrique, en montant deux cylindres pour un seul arbre.

Comment doit-on fixer[1], dans une machine compound, la pression moyenne p'_1 du réservoir par rapport aux pressions extrêmes p_1 et p_2? La pression du réservoir est parfois choisie de manière à ce que chacun des deux cylindres produise à peu près le même travail : cette répartition du travail est la plus convenable quand les deux pistons commandent deux manivelles d'un même arbre. Avec deux cylindres en tandem, elle n'a plus d'intérêt; elle doit être modifiée pour la compound à trois cylindres et trois manivelles, où le cylindre à basse pression est divisé en deux[2].

Quant au volume du réservoir, il peut être assez grand pour que les variations de la pression y soient peu sensibles; mais, avec la capacité, le poids et l'encombrement augmentent, ainsi que la perte extérieure de chaleur : aussi préfère-t-on souvent de petits réservoirs, où les fluctuations de la pression sont assez importantes. Les variations de pression

[1] Il faut remarquer qu'en réalité on ne fixe pas à volonté cette pression p_1 du réservoir, mais qu'elle s'établit d'après les conditions d'admission dans le grand cylindre et d'échappement du petit.

[2] Pour éviter des dimensions trop grandes du cylindre à basse pression, ou pour multiplier le nombre des manivelles motrices, on peut diviser ce cylindre en deux moitiés, alimentées toutes deux par le réservoir.

sont peu sensibles quand le volume du réservoir atteint celui du grand cylindre. Ces variations dépendent en outre du nombre des cylindres et du calage des manivelles.

On peut admettre, pour une estimation rapide, que le volume d'admission dans le grand cylindre doit être à peu près égal au volume du petit cylindre.

Outre les différentes qualités de la machine compound énumérées plus haut, elle permet de détendre suffisamment la vapeur avec une assez faible détente dans chacun des cylindres. L'effort moteur pendant une course varie moins que dans la machine monocylindrique, et la disposition compound permet de tirer bon parti de la distribution simple par tiroir.

Pour calculer rapidement les volumes des cylindres d'une machine compound devant produire une puissance déterminée dans des conditions données, on cherchera, par la formule donnée plus haut, le volume du cylindre de la machine monocylindrique qui donnerait même puissance en recevant le même volume de vapeur à la même pression initiale. Ce sera le cylindre à basse pression de la compound. Le cylindre à haute pression se détermine d'après la proportion admise entre les volumes des deux cylindres. Le plus souvent le grand cylindre est de 2, 5 à 3 fois plus grand que le petit. Quelquefois ce rapport descend jusqu'à 2; dans d'autres cas il est plus grand que 3.

Les courses étant les mêmes, le rapport des volumes est égal au rapport des carrés des diamètres des cylindres; par exemple, si le cylindre à haute pression a 500 mm de diamètre, le rapport des volumes sera 2 — 2, 5 — 3 pour des diamètres de 707 — 791 — 866 mm du cylindre à basse pression.

Quand on relève à l'indicateur des diagrammes sur les deux cylindres d'une machine compound, ces diagrammes ont habituellement même longueur, bien qu'ils se rapportent à des cylindres de volumes différents. Pour comparer directement ces diagrammes, on les transforme en modifiant,

pour l'un d'eux, les abscisses, de manière à les rendre proportionnelles aux volumes des cylindres. On groupe alors ces diagrammes par rapport à deux axes de coordonnées, de manière à figurer pour chacun, par une abscisse, l'espace libre correspondant (fig. 31). On obtient ainsi ce qu'on nomme le *diagramme totalisé*. Ce groupement est quelque peu arbitraire dans les machines à double effet, car chaque cylindre fournit deux diagrammes, et, généralement, les courses des divers pistons ne commencent pas en même temps : d'ailleurs, les deux diagrammes de chaque cylindre sont rarement identiques, à cause des irrégularités de la distribution et des fluctuations de la pression dans les réservoirs.

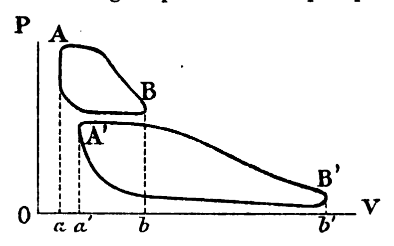


Fig. 31. — Diagramme totalisé de machine compound.

Oa, espace libre du petit cylindre. — ab, volume du petit cylindre. — Oa' et $a'b'$, espace libre et volume du grand cylindre.

41. Machines de Woolf. — Comme la compound, la machine du système *Woolf* a deux cylindres de dimensions différentes, qui communiquent, l'un avec la chaudière, l'autre avec le condenseur; mais il n'y a plus de réservoir entre les cylindres : les deux pistons ont une marche concordante et la vapeur passe immédiatement d'un cylindre dans l'autre, les passages formant des espaces libres en général assez grands.

Sur le diagramme théorique du travail, on représente en AB (fig. 32) le volume de vapeur à la pression initiale p_1 qui pénètre dans le premier cylindre et qui s'y détend jusqu'au volume H de ce cylindre, suivant la courbe BI. Pendant le retour du piston, les deux cylindres sont en communication; la vapeur continue à se détendre, en passant du volume H au volume V du second cylindre, suivant la courbe IE. Enfin

la vapeur s'échappe dans le condenseur à la pression p_2, pendant le retour du piston du second cylindre (droite FD). La détente est supposée incomplète. Le travail total est représenté par l'aire ABEFD; pour connaître la fraction de ce travail fournie par chaque cylindre, on construit la courbe ID' qui représente la contre-pression sur le petit piston pendant son retour, contre-pression égale à chaque

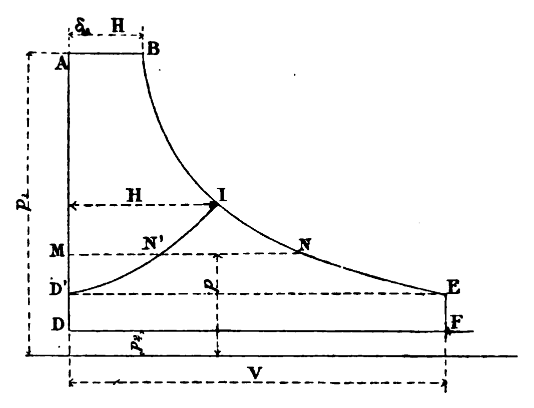


Fig. 32. — Diagramme théorique de la machine de Woolf; travail de la vapeur dans le premier cylindre, ABID'; travail dans le second cylindre, IEFDD'.

instant à la pression motrice sur le grand piston. Le travail du petit cylindre est représenté par l'aire ABID', celui du grand par IEFDD'; cette répartition est bien différente de celle que donne la machine compound.

Les diagrammes relevés à l'indicateur sur les machines de Woolf, pour les courses simples correspondantes des deux pistons, se présentent comme sur la figure 33 : AB montre l'admission de vapeur à la pression p_1, dans le petit cylindre; BI, la détente dans ce cylindre; IL, une chute de pression à l'échappement de ce cylindre; LK, la contre-pression décroissante sur le piston pendant sa course de retour; KA, la compression dans le petit cylindre à la fin de cette course

de retour. Le grand cylindre donne le diagramme L'K'EFJP (L'K', détente de la vapeur pendant la communication des deux cylindres ; K'E, fin de la détente, dans le grand cylindre seul; EFJ échappement et JP compression). Ce second diagramme est relevé sur un cylindre de volume V; pour le comparer au premier, il faut en multiplier la surface par le rapport $\frac{V}{H}$.

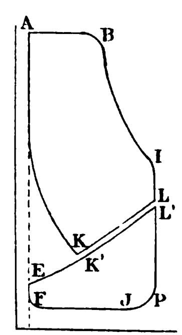


Fig. 33. — Diagrammes relevés sur une machine de Woolf.

La machine de Woolf a, sur la machine monocylindrique, une partie des avantages de la compound, mais paraît inférieure en principe à cette dernière. Les écarts de la température de la vapeur dans chaque cylindre sont, pour le premier t_1 et t'_2, pour le second t'_1 et t_2, t'_1 étant plus élevé que t'_2. Au lieu de s'arrêter à une limite commune, comme dans une compound à grand réservoir, les températures extrêmes dans les deux cylindres chevauchent. Lorsque le réservoir de la compound est petit, il se produit de même des fluctuations assez fortes de la pression lors de l'échappement du petit cylindre et de l'admission dans le grand.

42. Triple et quadruple expansion. — La théorie des machines *à triple expansion* est analogue à celle des machines compound : un cylindre *à haute pression* (fig. 34) reçoit la vapeur de la chaudière, à la pression p_1, et la laisse échapper dans un premier réservoir, où règne la pression p'_1 ; ce réservoir alimente un cylindre *intermédiaire*, dont l'échappement se fait dans un second réservoir, sous la pression p''_1 ; la vapeur traverse ensuite le cylindre *à basse pression*, qui communique enfin avec le condenseur.

Le diagramme théorique (fig. 35) est découpé en trois tranches par deux parallèles à l'axe OV, au lieu d'être partagé en deux parties seulement comme dans la compound.

En réalité, il y a généralement une chute de pression à

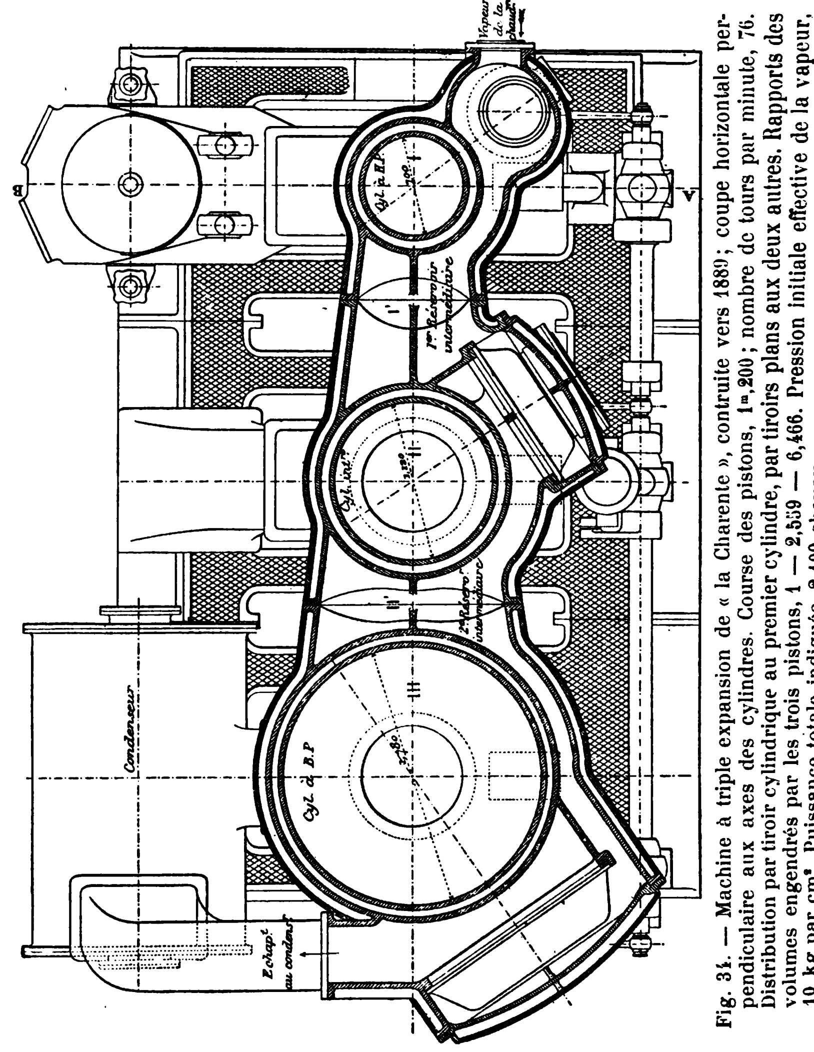


Fig. 34. — Machine à triple expansion de « la Charente », contruite vers 1889; coupe horizontale perpendiculaire aux axes des cylindres. Course des pistons, 1m,200; nombre de tours par minute, 76. Distribution par tiroir cylindrique au premier cylindre, par tiroirs plans aux deux autres. Rapports des volumes engendrés par les trois pistons, 1 — 2,559 — 6,466. Pression initiale effective de la vapeur, 10 kg par cm². Puissance totale indiquée, 2.400 chevaux.

l'échappement de chaque cylindre; les pressions dans les

réservoirs sont un peu moindres que p'_1 et p''_1, et il en résulte un déchet sur le travail total, figuré par les surfaces triangulaires couvertes de hachures.

Plus encore que dans la compound, à égalité des pressions extrêmes, on réduit les écarts de température dans chaque cylindre, l'influence des espaces libres, et on facilite la compression complète de la vapeur dans ces espaces; toutefois

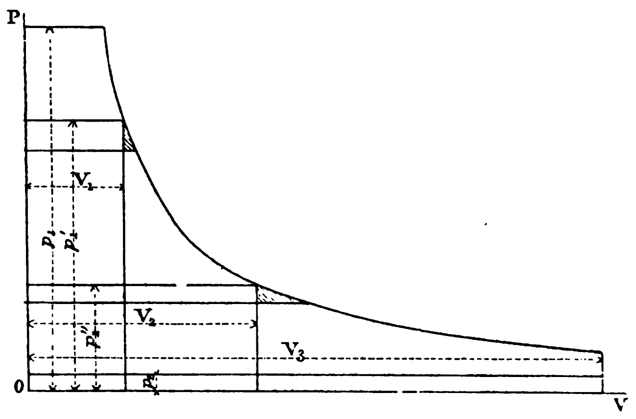


Fig. 35. — Diagramme théorique de la machine à triple expansion.

cette division du diagramme en trois parties n'est guère pratique que lorsque les écarts des pressions extrêmes p_1 et p_2 sont assez grands, par suite de l'accroissement de la pression p_1. En fait, l'écart des pressions dans les deux derniers cylindres, à moyenne et à basse pression, des machines à triple expansion qu'on construit aujourd'hui est à peu près le même que dans les cylindres des compound construites il y a quinze ou vingt ans. Les valeurs de la pression initiale p_1 sont fréquemment comprises entre 10 et 12 kg par cm² et dépassent même ce dernier nombre.

On a transformé des machines compound en machines à triple expansion, en augmentant la pression initiale de la vapeur et en ajoutant un cylindre, qui reçoit la vapeur sous cette pression majorée et la laisse échapper dans un réser-

voir ; ce réservoir alimente le cylindre à haute pression de la compound, devenu cylindre à *moyenne pression.*

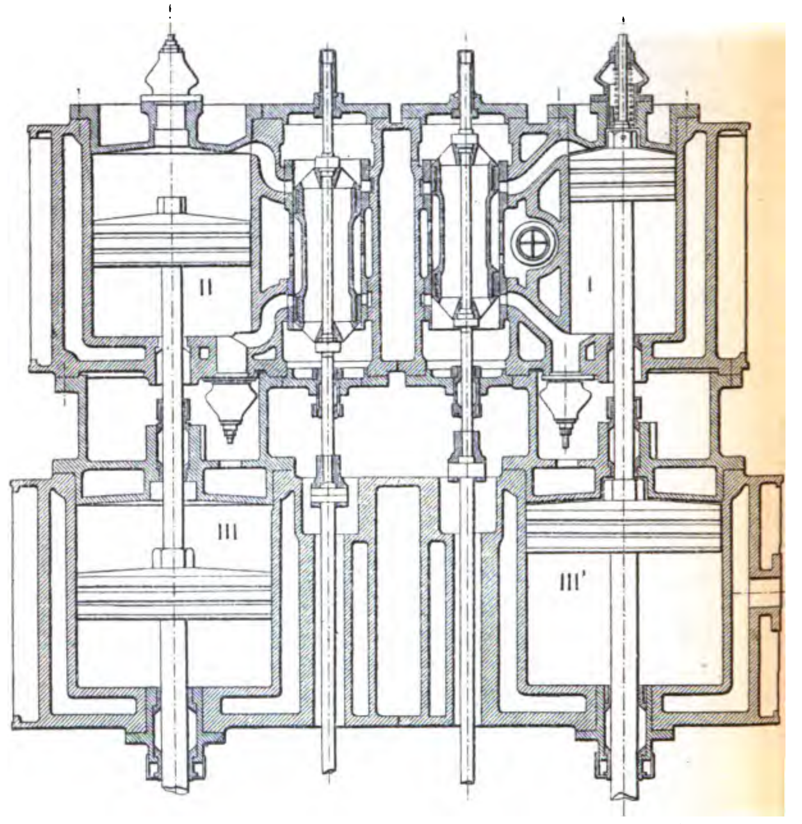


Fig. 36. — Machine pilon à triple expansion, à quatre cylindres. construite par Weyher et Richemond ; coupe longitudinale des cylindres. La distribution se fait dans les cylindres I et II par tiroirs cylindriques. Pour les deux demi-cylindres III et III' il y a des tiroirs plans placés latéralement.

Dans les machines entièrement neuves, on cherche souvent à donner aux trois cylindres des proportions telles que chacun produise le tiers du travail total, quand chaque

cylindre commande une manivelle d'un arbre unique, les trois manivelles étant calées à 120°. Pour n'avoir que deux manivelles, on place en tandem deux des trois cylindres ; souvent alors on divise en deux le dernier cylindre, et la machine comprend deux groupes de deux cylindres en tandem (fig. 36).

Les volumes des cylindres ont des rapports assez variables dans les machines à triple expansion. On peut indiquer

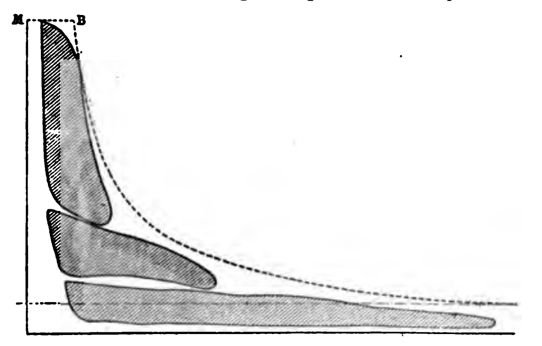


Fig. 37. — Diagramme totalisé d'une machine à triple expansion.

les proportions 1 — 2,5 à 2,8 — 6 à 7 pour les trois cylindres successifs. Quand le dernier cylindre est divisé en deux, c'est la somme des volumes de ces deux parties qui forme le troisième terme de la série.

Les deux réservoirs intermédiaires sont en général assez petits, pour ne pas encombrer la machine et ne pas exagérer le refroidissement extérieur. Aussi constate-t-on souvent des fluctuations de la pression dans les réservoirs pendant un tour de la machine, fluctuations qui n'ont pas grand inconvénient quand elles ne sont pas excessives.

Pour tracer le *diagramme totalisé*, on amplifie les abscisses des diagrammes d'indicateur relevés sur le moyen et le grand cylindre suivant les rapports des volumes de ces cylindres au volume du petit cylindre. Les surfaces donnent alors à la même échelle le travail obtenu dans chaque cylindre (fig. 37).

L'usage des machines à triple expansion est général pour

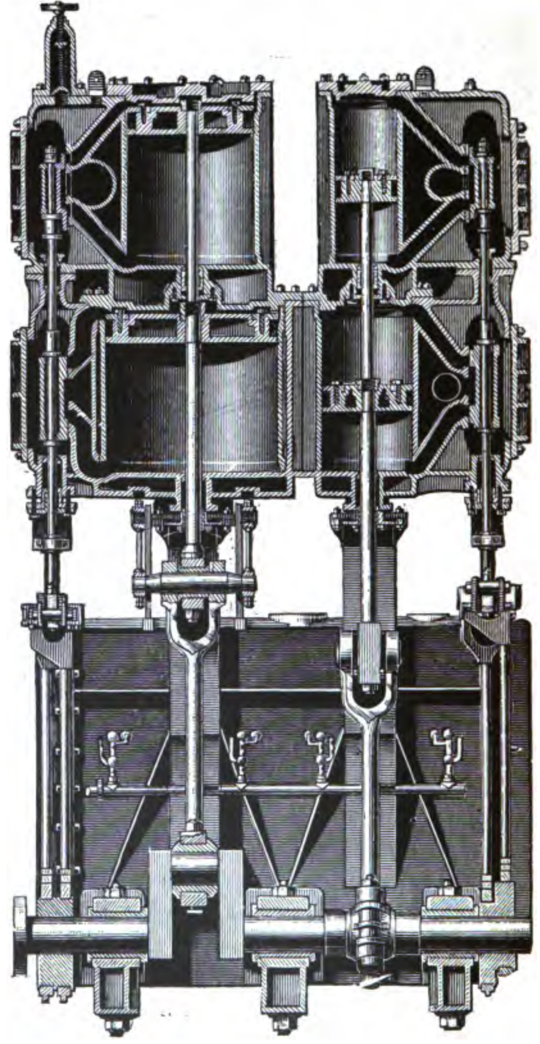


Fig. 38. — Machine à quadruple expansion, à deux manivelles (d'après Thurston).

les constructions de la marine, comme était celui de la compound il y a vingt ou vingt-cinq ans. On les emploie aussi comme moteurs fixes.

On peut pousser encore plus loin la division du diagramme théorique, en employant quatre cylindres successifs et trois réservoirs intermédiaires. C'est ce qu'on fait quelquefois pour des machines marines et fixes avec une pression initiale élevée. La quadruple détente se prête bien à l'emploi de deux groupes en tandem, avec deux manivelles à angle droit (fig. 38). La proportion des volumes des cylindres sera par exemple, 1 — 2,25 — 5 — 11, ce qui donne, avec une même course, pour les rapports des diamètres, 1 — 1,5 — 2,24 — 3,32.

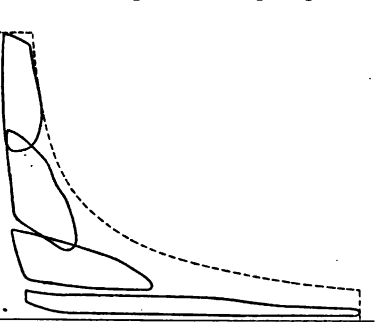


Fig. 39. — Diagramme totalisé d'une machine à quadruple expansion.

Le diagramme totalisé se construit toujours d'après les mêmes principes (fig. 39).

43. Vapeurs combinées. — Les machines à vapeurs combinées se composent de deux moteurs, actionnés l'un par la vapeur d'eau, l'autre par la vapeur d'un liquide plus volatil, tel que l'éther; la vapeur d'eau s'échappe du premier moteur dans un condenseur à surface (chap. x), refroidi, non par un courant d'eau à la manière ordinaire, mais par le liquide volatil, qui se vaporise aux dépens de la chaleur abandonnée par l'eau qui se condense.

Le condenseur du premier moteur sert de chaudière à l'autre : dans ses deux enceintes, que sépare une surface métallique suffisamment étendue, la température est à peu près la même, mais à cette température (60° environ),

la pression de la vapeur d'eau est faible, tandis que la pression du second liquide est beaucoup plus grande[1].

Après avoir travaillé dans le second moteur, la vapeur du second liquide se liquéfie dans un condenseur à surface, entretenu à une température aussi basse que possible par un courant d'eau. Une pompe alimentaire renvoie le liquide au condenseur évaporatoire.

Du Tremblay a employé l'éther, et Lafont, le chloroforme, vers 1850. Dans les machines récentes de Behrend et Zimmermann, le second liquide est l'anhydride sulfureux (nom usuel, acide sulfureux).

Cette combinaison a un avantage : dans la machine ordi-

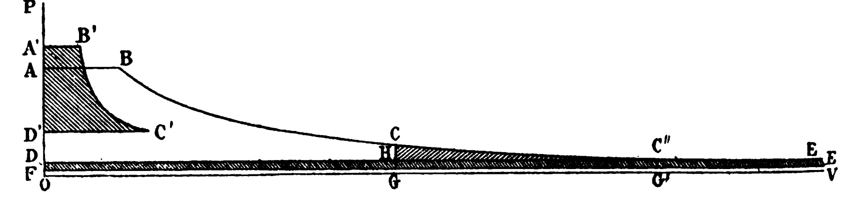


Fig. 40. — Diagrammes théoriques des machines à vapeurs combinées. Le point E est en dehors de la figure, vers la droite, à l'intersection de la courbe de détente BC et de la droite FG.

naire, la vapeur d'eau évolue entre des températures qui sont, par exemple, 180° et 20° : mais la pression et la densité de la vapeur deviennent si faibles vers cette limite inférieure, qu'il faudrait un cylindre de dimensions inacceptables pour en utiliser toute la détente : le diagramme complet serait ABCEF (fig. 40) ; aussi ne réalise-t-on que le diagramme ABCGF, FG représentant le volume du cylindre, et on perd le travail représenté par la surface CEG. Dans la machine à vapeurs combinées, la vapeur d'eau en se condensant vaporise un fluide dont la vapeur a une pression

[1] Pressions de la vapeur à 60° : eau, 0,2 kg par cm²; éther, 2,35; chloroforme, 1 kg par cm². A 70°, ces pressions sont respectivement 0,32 — 3,12 — 1,4 kg par cm².

beaucoup plus élevée : par exemple, cette pression est représentée par l'ordonnée OA', tandis que la pression de la vapeur d'eau, à la même température, est OD. A la température finale de condensation cette pression est OD' au lieu de OF pour l'eau. On a ainsi une vapeur pratiquement utilisable dans un cylindre pour produire du travail, parce qu'elle exerce une pression suffisamment forte par cm^2 ; on obtient le travail A'B'C'D' dans un cylindre de volume D'C'.

Il faut bien remarquer que tout le travail ainsi recueilli dans le second cylindre n'est pas un bénéfice net supplémentaire par rapport à la machine à vapeur d'eau seule ; car la vapeur d'eau est condensée à une température plus élevée et, par conséquent, la contre-pression à l'échappement est plus forte ; cette contre-pression sera OD au lieu de OF, et le travail du premier cylindre est réduit de la quantité DHGE. Mais cette réduction est moindre que la quantité gagnée dans le second cylindre. On remarquera que le travail CC''H de la détente de la vapeur d'eau n'est pas recueilli si le premier cylindre a un volume OG, au lieu de OG' : c'est une perte analogue à la perte triangulaire dans le diagramme des compound.

En pratique, le transfert de chaleur de la vapeur d'eau au fluide volatil ne va pas sans quelque perte de chaleur au dehors ; en outre, la température de l'eau qui se condense est un peu plus élevée que celle du fluide volatil qui se vaporise, ce qui diminue la pression de ce fluide.

Certaines précautions sont nécessaires pour la marche de ces machines : il faut que tous les joints soient parfaitement étanches, ainsi que les garnitures de tiges de piston, afin d'éviter toute fuite du second fluide, fuites qui seraient fort gênantes et, en outre, exigeraient le renouvellement d'une substance assez coûteuse. Les condenseurs doivent aussi avoir une étanchéité parfaite. Avec l'anhydride sulfureux, il est indispensable d'éviter la moindre introduction d'eau qui formerait de l'acide sulfurique, destructeur des appareils. Il ne faut non plus aucune graisse dans le

cylindre ; mais le graissage ne paraît pas nécessaire dans ce cas.

Comme exemple de cette combinaison, une machine à triple expansion du collège technique de Charlottembourg a été complétée par l'addition d'un cylindre à anhydride sulfureux. Les cylindres à vapeur d'eau ont des diamètres de 270, 430 et 670 mm, avec course de 505 mm ; le cylindre à anhydride sulfureux a 256 sur 505 mm ; le nombre commun de tours est de 150 par minute. La première machine produit 150 chevaux, la seconde 60, mais l'augmentation réelle de puissance est moindre que 60 chevaux, parce que la seconde machine réduit un peu la puissance développée par la première.

La surface du vaporisateur à anhydride sulfureux (condenseur pour la vapeur d'eau) doit être de 3 à 4 m^2 par cheval de la machine actionnée par ce fluide ; celle du condenseur final est de 1 à 1,5 m^2 par cheval de la même machine. Vaporisateurs et condenseurs doivent être munis de soupapes de sûreté.

Tandis que les meilleures machines à vapeur d'eau seule dépensent environ 5 kg de vapeur par cheval-heure indiqué [1], cette dépense peut être abaissée à 4 kg par l'emploi du second fluide. Ainsi que le faisait remarquer feu M. le professeur Thurston, le succès définitif de ces appareils dépend de leur économie totale et pratique, de leur sécurité, et de la facilité de leur entretien, questions qu'une longue pratique peut seule trancher [2].

Les premières applications du principe, vers 1850, n'eurent pas de succès pratique prolongé ; elles ont disparu au bout de quelques années. Il convient de remarquer que l'introduction de la machine compound, vers cette époque, a donné de telles économies, pour les appareils de navigation,

[1] Avec la vapeur surchauffée, on a obtenu des consommations inférieures à 5 kg.

[2] Voir sur ces appareils le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, déc. 1901, p. 798, et déc. 1902, p. 841.

que cette cause a pu contribuer à faire délaisser les machines à éther et à chloroforme. La machine compound peut être envisagée aussi comme une sorte de machine à vapeurs combinées, mais où le même fluide travaille dans les deux cylindres successifs.

44. Essais des machines. — L'observation précise des machines est nécessaire pour en étudier la théorie comme pour en apprécier le fonctionnement pratique. Les deux quantités fondamentales à déterminer sont le poids de la vapeur consommée et le nombre des kilogrammètres produits dans un temps donné.

La consommation de vapeur se mesure par le jaugeage de l'eau d'alimentation introduite dans la chaudière qui la produit, le niveau de l'eau dans cette chaudière étant exactement le même au début et à la fin de l'essai. Pour que cette mesure corresponde effectivement à la consommation de la machine, il faut qu'aucune fuite n'existe à la chaudière et à la tuyauterie de vapeur, et que les soupapes de sûreté ne se soulèvent pas pendant l'essai[1].

Quand on dispose d'un condenseur à surface, on peut jauger l'eau qui provient de la condensation de la vapeur qui a traversé la machine. Il faut vérifier que ce condenseur est bien étanche et ne donne lieu à aucune rentrée de l'eau de circulation, qui se mêlerait à l'eau condensée recueillie.

Lorsque le cylindre du moteur est muni d'une enveloppe dont l'eau retourne directement à la chaudière, cette dépense de vapeur n'est pas mesurée dans les deux méthodes qui viennent d'être indiquées ; et cependant elle correspond à un apport de chaleur fournie par la chaudière. Dans les essais précis, on recueille à part l'eau condensée dans les enveloppes.

On mesure la pression de la vapeur, qu'il faut maintenir

[1] On trouvera dans le chapitre relatif aux chaudières des détails sur la mesure de la dépense de combustible.

aussi constante que possible pendant la durée de l'essai, à l'aide d'un manomètre placé sur la boîte à vapeur du cylindre, où elle peut être moindre qu'à la chaudière[1].

Quand la machine fonctionne à condensation, on relève la pression dans le condenseur; il est bon d'y prendre aussi la température[2], à l'aide d'un thermomètre placé à la sortie de l'eau.

Il est utile de déterminer le degré d'humidité de la vapeur à son arrivée au moteur, mais cette mesure est assez délicate, et sort du cadre des essais pratiques ordinaires. Quand on fait usage de vapeur surchauffée, la mesure de la température est facile et doit toujours être faite dans un essai[3].

La mesure du travail se fait avec l'indicateur. Pour une expérience précise, il faut que le régime de la machine soit bien uniforme pendant toute la durée de l'essai. On doit donc maintenir avec aussi peu de variations que possible la résistance opposée à la machine, la pression de la vapeur, et le degré d'admission. On relève des diagrammes à intervalles égaux, plus ou moins rapprochés suivant la nature de l'expérience (scientifique ou de contrôle).

A l'aide d'un compteur de tours, dont on observe de temps en temps les indications, on mesure la vitesse de rotation.

[1] Ne jamais oublier d'indiquer, en inscrivant des pressions, s'il s'agit de pressions absolues ou effectives.

[2] Cette température ne correspond pas à la pression de vapeur saturée, à cause de la présence d'une certaine quantité d'air dans le condenseur (voir chap. x).

[3] Pour mesurer la température de la vapeur, on ménage sur la paroi de la conduite un trou taraudé, dans lequel on visse un tube de petit diamètre, ouvert à l'extérieur, fermé à l'autre bout, qui pénètre jusque vers le milieu du courant de vapeur. On place ce tube verticalement, ou avec une forte inclinaison, l'ouverture étant à la partie supérieure, de sorte qu'on y puisse verser un liquide, mercure ou huile, qui prend la température de la vapeur et dans lequel plonge le thermomètre. Il peut y avoir de très petits écarts entre la température réelle de la vapeur, et celle qu'indique le thermomètre ainsi disposé.

Le travail total produit pendant l'essai se déduit des ordonnées moyennes des diagrammes, dont on peut prendre la moyenne générale s'ils présentent peu d'écarts, et du nombre de tours de l'arbre. Connaissant les dimensions des cylindres (diamètre et course[1]), on calcule aisément le nombre de kilogrammètres, ou de chevaux-heures.

A un autre point de vue, l'examen du diagramme permet d'apprécier le réglage de la distribution.

La durée de l'essai doit être aussi longue que le permettent les conditions de fonctionnement de l'appareil. Il est bon d'y consacrer une journée entière, en profitant des diverses périodes de marche sans arrêt.

Cette méthode donne la puissance indiquée. Il est intéressant de connaître aussi la puissance effective, relevée à l'aide d'un dynamomètre. Mais cette mesure exige en général des installations difficiles et coûteuses. On peut obtenir une indication approximative du rendement mécanique (rapport de la puissance effective à la puissance indiquée), en mesurant avec l'indicateur la puissance consommée par la machine tournant à vide : pour cela, on réduit l'admission, ou on lamine la vapeur suivant les cas. On admet que la puissance consommée par les résistances passives de la machine reste la même quand elle travaille à vide et à pleine charge, ce qui n'est évidemment pas rigoureux.

Dans certaines installations, on peut mesurer directement le travail utile produit, par exemple la quantité d'eau élevée à une hauteur connue par une pompe, l'intensité et la tension d'un courant électrique. Mais on voit que ce résultat utile dépend de deux rendements successifs, dans le moteur et dans la pompe ou la dynamo qu'il commande.

Ayant mesuré la quantité de vapeur dépensée et la quan-

[1] Le diamètre doit être relevé exactement en profitant d'un démontage du plateau du cylindre. On doit aussi tenir compte de la dilatation produite par la chaleur. Une élévation de température de 180° augmente le diamètre d'environ 0,002, et le volume de 0,004.

tité de travail indiqué produite, on voit ce qu'exige un cheval-heure. Pour avoir une appréciation précise du moteur, il faut déterminer la dépense de vapeur qu'exigerait le cycle théorique, entre les mêmes pressions à l'admission et à l'échappement : on voit de combien la machine réelle s'écarte de la machine fictive parfaite.

Au lieu du poids de vapeur, qui ne constitue pas une unité précise, parce que la quantité de chaleur nécessaire pour la produire varie suivant la température initiale de l'eau d'alimentation, la pression, l'état d'humidité ou de surchauffe, il est préférable d'indiquer, pour la machine réelle et pour la machine idéale, les quantités de chaleur correspondantes, qu'il est facile de calculer dans chaque cas, à l'aide des nombres donnés dans les tables.

Ci-dessous on trouvera quelques exemples des consommations de bonnes machines :

MACHINE CORLISS DU CREUSOT ; CYLINDRE DE 550 SUR 1 100 MM, AVEC ENVELOPPE DE VAPEUR ; MARCHE A CONDENSATION

Pression effective moyenne de la vapeur.	7,75 kg par cm²
Admission, en centièmes de la course . .	12,5
Nombre de tours par minute.	58,1
Puissance indiquée, en chevaux.	215
— effective —	177,4
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	7,87 kg
Poids de vapeur condensée dans l'enveloppe, par kg de la dépense totale. . .	32 g

MACHINE COMPOUND A SOUPAPES DE SULZER ; CYLINDRES DE 320 ET 525 SUR 900 MM, AVEC ENVELOPPES DE VAPEUR ; MARCHE A CONDENSATION

Pression effective de la vapeur	9,15 kg par cm²
Nombre de tours par minute.	85
Puissance indiquée en chevaux	182,6
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	6,5 kg

La même machine, avec vapeur surchauffée de 82°, et pression effective de 9,06 kg par cm², produisant 175,6 chevaux indiqués, a dépensé 5,58 kg par cheval-heure.

MACHINE COMPOUND A DISTRIBUTEURS VAN DEN KERCHOVE; CYLINDRES DE 325 ET 560 SUR 850 MM, AVEC ENVELOPPES; MARCHE A CONDENSATION (ESSAIS DE M. LE PROFESSEUR SCHRÖTER, EN 1902).

1° *Vapeur saturée.*

Pression effective moyenne de la vapeur.	8,93 kg par cm²
Nombre de tours par minute.	126,9
Puissance indiquée en chevaux	167,65
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	5,28 kg
Condensation dans l'enveloppe du cylindre à haute pression, par kg de la dépense totale.	49,8 g
Condensation dans l'enveloppe du cylindre à basse pression	87,2 g
Dépense de calories par cheval-heure indiqué	3490

2° *Vapeur surchauffée.*

Pression effective moyenne de la vapeur.	9,21 kg par cm²
Surchauffe (au-dessus de la température de saturation)	124°.4
Nombre de tours par minute	126,9
Puissance indiquée en chevaux	167,65
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué	4,31 kg
Condensation dans l'enveloppe du cylindre à haute pression, par kg de la dépense totale	3,8 g
Condensation dans l'enveloppe du cylindre à basse pression	35,1 g
Dépenses de calories par cheval-heure indiqué	3130

MACHINE A TRIPLE EXPANSION, A SOUPAPES, DE SULZER ; CYLINDRES DE 865,2 — 1250 — DEUX DE 1550,1 SUR 1300 MM, AVEC ENVELOPPES ; MARCHE A CONDENSATION.

Pression effective de la vapeur.	13,33 kg par cm²
Nombre de tours par minute.	83,5
Puissance indiquée en chevaux	3040,4
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	5,259 kg

La même machine, avec vapeur surchauffée de 116° et pression effective de 12,83 kg par cm², produisant 2883,3 chevaux indiqués, a dépensé 4,27 kg par cheval-heure.

CHAPITRE V

DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

45. Phases de la distribution. — Dans le cylindre d'une machine à double effet, chacun des deux compartiments, que sépare le piston, est en communication tantôt avec une source de vapeur à la pression supérieure, tantôt avec une enceinte où règne une pression moindre; à d'autres instants, ce compartiment est complètement isolé: alors la vapeur qu'il renferme se détend ou est comprimée, selon le sens du mouvement du piston.

La distribution comprend ainsi, pour chacun des deux compartiments, qu'il convient de considérer isolément, quatre phases, l'*admission*, la *détente*, l'*échappement*, la *compression*.

En tenant compte des changements dans le sens du mouvement du piston, on subdivise ces quatre phases en six :

Pendant l'aller du piston { 1° l'admission ; 2° la détente ; 3° l'échappement anticipé :

Pendant le retour du piston { 4° l'échappement ; 5° la compression ; 6° l'admission anticipée.

Le piston n'effectue qu'un faible parcours pendant la sixième phase, qui même n'existe pas dans beaucoup de machines. Souvent aussi les périodes d'échappement anticipé et de compression (3e et 5e) ne correspondent qu'à de petits déplacements du piston.

La figure 41 représente les diagrammes d'indicateur relevés dans les deux compartiments du cylindre, ou, comme

on dit, sur les deux *faces* du piston ; les commencements des six périodes de la distribution sont numérotés. On voit, sur ces diagrammes, les laminages de la vapeur qui dépendent de la grandeur des orifices de passage et de la vitesse

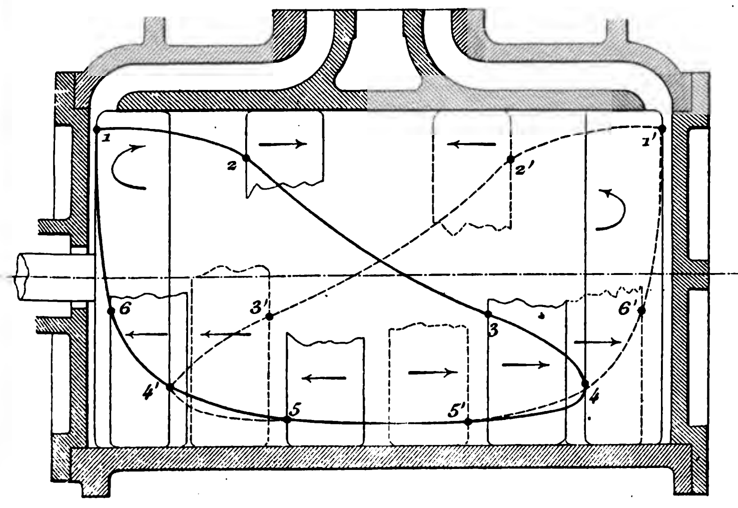


Fig. 41. — Diagrammes de la pression sur les deux faces du piston.

1, 2, pression sur la face gauche du piston pendant l'admission ; — 2, 3, pendant la détente ; — 3, 4, pendant l'échappement anticipé ; — 4, 5, pendant l'échappement ; — 5, 6, pendant la compression ; — 6, 1, pendant l'admission anticipée ; — 1', 2', 3', 4', 5', 6', mêmes phases sur la face droite du piston.

du piston. La figure 42 montre, en traits ponctués, le diagramme que donnerait la machine marchant avec une assez grande lenteur pour qu'il n'y ait aucune chute de pression au passage des orifices du cylindre ; le diagramme avec laminage de la vapeur est tracé en traits pleins.

En étudiant la distribution dans un cylindre, on détermine, pour ses deux faces, les positions du piston lors de l'ouverture et de la fermeture des orifices d'admission et d'échappement, positions correspondant aux numéros 2 — 3 — 5 — 6 et 2' — 3' — 5' — 6' des figures ; si on connaît, en outre, à chaque instant, la dimension de l'ouverture pen-

dant les périodes d'admission et d'échappement, 6 à 2 et 3 à 5, 6' à 2' et 3' à 5', ainsi que la vitesse du piston, on peut apprécier les chutes de pression dues au laminage.

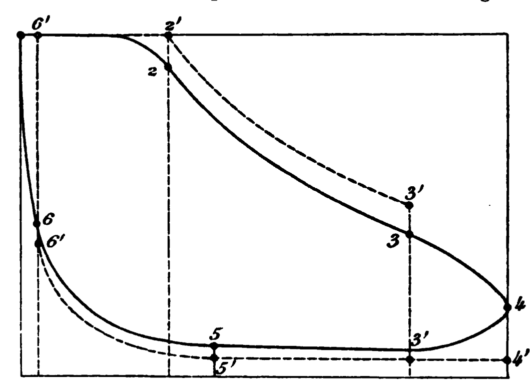


Fig. 42. — Phases de la distribution sans laminages (trait ponctué) et avec laminages (trait plein).

46. Tiroir unique et excentrique. — Pour ouvrir et fermer un orifice, le système le plus simple consiste en une plaque qui peut glisser sur une table plane percée d'une ouverture, que la plaque découvre et recouvre ; la vapeur, qu'il s'agit de laisser passer et d'arrêter, accède librement au-dessus de la plaque et la maintient constamment appliquée sur la table. Mais une telle plaque ne remplit qu'une fonction unique, et le sens du mouvement de la vapeur ne peut être renversé, comme il le faudrait pour l'échappement,

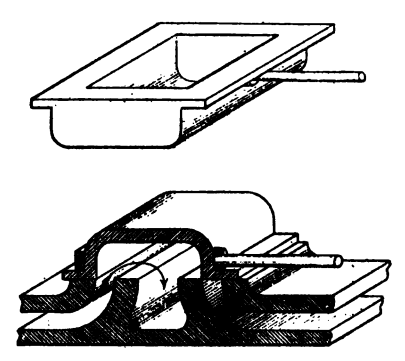


Fig. 43. — Tiroir ordinaire ; vue en dessous ; coupe du tiroir et des lumières.

parce que la pression soulèverait la plaque. En creusant la face de la plaque qui glisse sur la table, on établit la communication de l'orifice avec une seconde ouverture de la table, qui sert pour l'échappement : tel est le tiroir ordinaire (fig. 43).

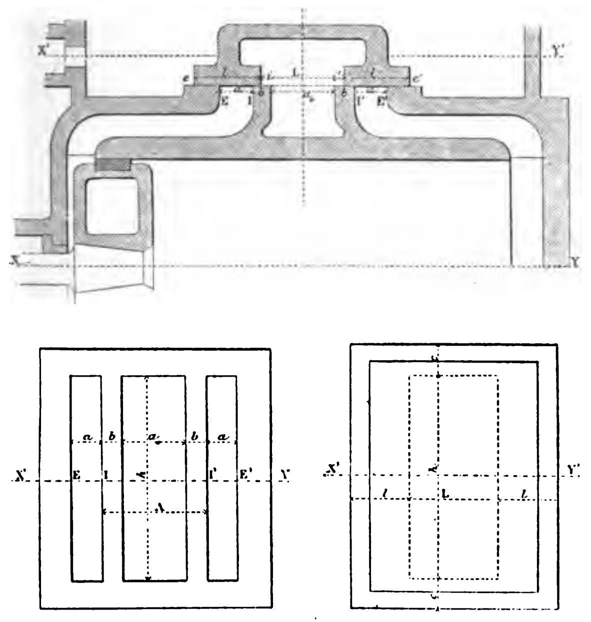


Fig. 44. — Lumières du cylindre et tiroir : coupe longitudinale ; vue en dessus des lumières, le tiroir enlevé ; vue en dessus du tiroir.

La figure 44 représente les deux *lumières* d'admission, aboutissant aux fonds du cylindre, et celle du milieu, qui sert pour l'échappement. Les ouvertures des lumières sur la *table* sont des rectangles de hauteur commune h et de bases a, a_0, a', séparées par des barrettes de largeur b. La longueur $b + a_0 + b$, est désignée par la lettre A. Le tiroir présente une face plane qui s'applique exactement et qui glisse sur la table ; cette face est un rectangle de hauteur

$h + 2c$ un peu plus grande que h. La face plane du tiroir pré-

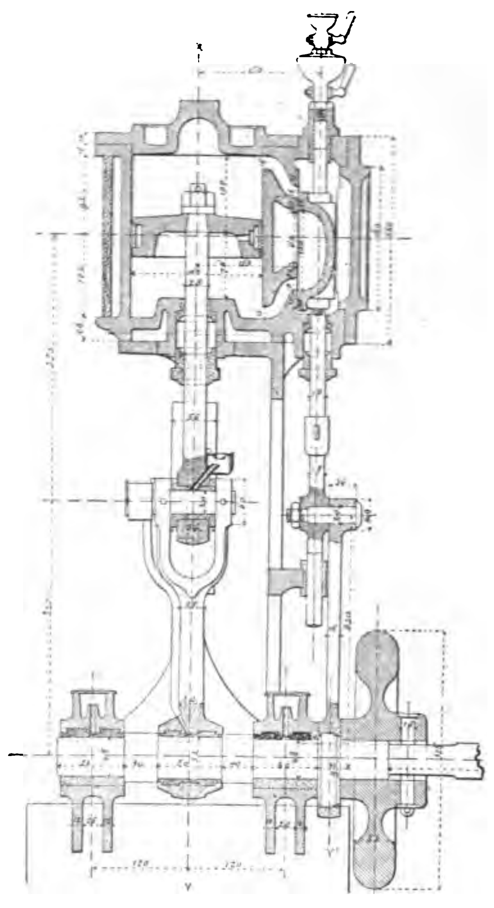


Fig. 45. — Cylindre et tiroir avec axes parallèles, placés avec l'axe de l'arbre moteur dans un plan unique, pour une machine pilon : coupe verticale par le plan des axes. Dans la position figurée, l'admission a lieu au-dessus du piston, et l'échappement en dessous.

sente en outre un évidement rectangulaire de hauteur h.

Dans les machines simples, le tiroir est conduit par une manivelle de rayon r, le plus souvent de l'espèce dite *excentrique*. Fréquemment, les axes du cylindre et de la tige du tiroir sont parallèles et un même plan contient ces deux axes et celui de l'arbre (fig. 45).

Dans les tracés qui suivent, le mouvement du tiroir est représenté dans le plan de l'excentrique, perpendiculaire à l'arbre moteur ; sur la figure 46 notamment, la coupe du tiroir et des lumières est supposée rabattue dans ce plan.

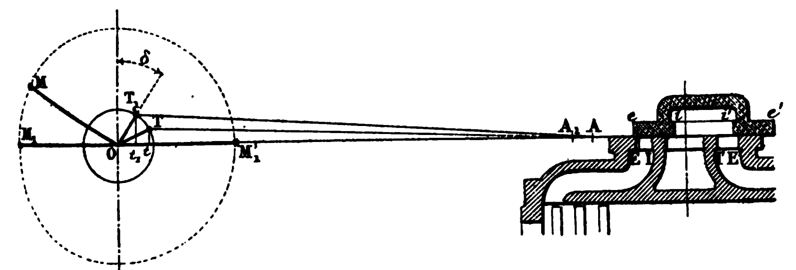


Fig. 46. — Commande du tiroir par un excentrique; coupe par un plan perpendiculaire à l'arbre; la coupe des lumières du cylindre et du tiroir est rabattue, par une rotation de 90°, sur le plan de la figure.

Les dimensions, qui caractérisent une distribution par tiroir, sont celles des lumières, du tiroir, du mécanisme de commande, et enfin une cote qui précise la position du tiroir sur la table des lumières.

Pour les lumières, il faut avant tout fixer les distances des bords des deux lumières extrêmes, c'est-à-dire les trois longueurs EI, II', I'E' (fig. 44), désignées par les lettres a, A et a' ; il est rare que les largeurs a et a' ne soient pas égales.

Les dimensions caractéristiques du tiroir sont de même les distances de leurs quatre bords, *ei*, *ii'* et *i'e'*, désignées par l, L et l' : les longueurs l et l' sont fréquemment égales.

Le mécanisme de commande est défini par le *rayon d'excentricité* r et par l'*angle* que fait ce rayon avec la mani-

velle motrice, compté dans le sens du mouvement de rotation ; on appelle *angle d'avance* (δ sur les figures) ou *avance angulaire*, l'excès de cet angle sur un angle droit. Il faut aussi connaître la longueur de la bielle ou *barre d'excentrique*, TA (fig. 46).

Enfin la position du tiroir sur la table des lumières est précisée quand on indique la distance du bord mobile *e* au bord fixe E, pour une position déterminée de la machine, par exemple lorsque la manivelle motrice est à son *point mort* OM_1 ; à ce moment, le piston est à fond de course du côté de la lumière EI. Cette distance E*e*, pour cette position de la machine, s'appelle *avance linéaire* du tiroir ; elle est souvent très petite et même nulle.

Qu'on suppose fixées toutes ces cotes caractéristiques ; en partant de la position initiale OT_1, occupée par le rayon d'excentricité quand le piston est à fond de course, qu'on fasse faire un tour complet à l'arbre de la machine, et qu'on observe le déplacement du bord *e* du tiroir, par rapport au bord E de la lumière ; au début, la lumière s'ouvre, ou est déjà légèrement ouverte : le bord mobile *e* est en contact avec le bord fixe E ou bien l'a légèrement dépassé vers la droite, sur la figure ; puis, tant que *e* continue son mouvement vers la droite, la lumière EI s'ouvre de plus en plus ; l'ouverture se rétrécit quand *e* se déplace en sens contraire, pour être complètement close lorsque *e* se trouve au delà de E : en résumé, l'ouverture et la fermeture ont lieu quand le bord mobile du tiroir, *e*, passe sur le bord fixe de la lumière, E ; la lumière est ouverte ou fermée suivant que *e* se trouve plus ou moins éloigné que E du point O, centre de l'arbre.

La communication avec le condenseur, pour le même côté du piston, commence et cesse quand le bord intérieur du tiroir, *i*, passe sur le bord I de la lumière ; cette communication est ouverte ou fermée suivant que le bord *i* est plus rapproché ou plus éloigné du centre O que le bord I.

Connaissant ainsi les positions des bords du tiroir, *e* et *i*,



qui produisent l'ouverture et la fermeture de la lumière EI, pour l'admission et pour l'échappement, sur le côté du piston desservi par cette lumière, on en déduit les positions correspondantes du rayon d'excentricité OT, qui conduit le tiroir.

Pour la seconde lumière, qui dessert l'autre face du piston, ce sont les déplacements du bord *e'* du tiroir, par rapport au bord fixe E', et du bord *i'* par rapport à I', qui règlent l'admission et l'échappement.

L'étude de ces mouvements serait peu commode, s'il fallait tracer, pour chaque position intéressante du tiroir, le mécanisme complet de commande, avec sa longue bielle : mais ce tracé peut être simplifié. Le mécanisme étant dans une position quelconque, OTA (fig. 46), l'arc de cercle T*t*,

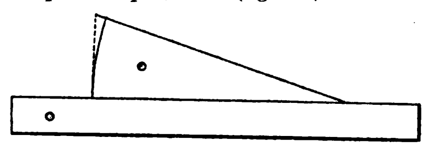


Fig. 47. — Gabarit pour le tracé exact du déplacement du tiroir : le rayon du petit côté de l'équerre est égal à la longueur de la barre d'excentrique (à l'échelle du dessin).

dont A est le centre et AT le rayon, détermine une longueur A*t* égale à celle de la barre d'excentrique AT, longueur A*t* qui prolonge, vers l'arbre, la tige du tiroir. Si cette tige était effectivement prolongée de la sorte, et portait en *t* un modèle du tiroir, avec ses dimensions caractéristiques, *l*, L, *l'*, ce modèle, lié par une tige rigide au véritable tiroir, en répéterait les mouvements pendant la marche de la machine ; le tiroir serait ainsi rapproché du cercle décrit par le rayon de l'excentrique, OT, ce qui faciliterait le tracé de l'épure. On obtient aisément le point *t*, correspondant à T, en traçant l'arc de cercle de rayon égal à la longueur de la bielle du tiroir, à l'aide d'un *gabarit* simple, construit en taillant le petit côté d'une équerre à dessin suivant le rayon voulu (fig. 47).

Il faut transporter en même temps les points fixes de la table sur laquelle se meut le tiroir : en désignant par ε l'avance linéaire, pour la position initiale OT_1, le point E est à la distance ε du bord e du tiroir, alors en t_1 (fig. 48). L'arbre tournant dans le sens de la flèche, le point e s'éloigne de E, en ouvrant de plus en plus la lumière, jusqu'à ce qu'il arrive en T' ; alors il se rapproche de E, qu'il rencontre

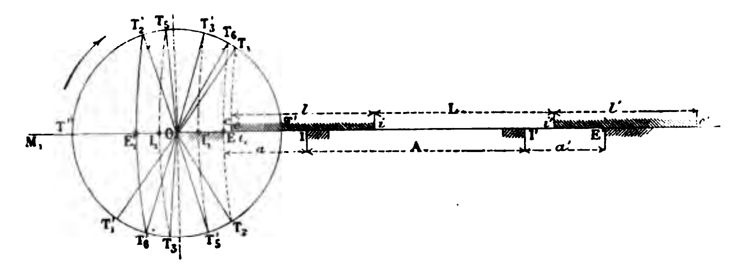


Fig. 48. — Mouvement du tiroir sur la table des lumières.

lorsque le rayon d'excentricité passe en OT_2. La lumière reste alors fermée pour l'admission, jusqu'à ce que le rayon passe en OT_6 ; à ce moment commence l'*admission anticipée*.

Pour l'échappement, on doit suivre le mouvement du bord i du tiroir, qui est à la distance l du bord e, par rapport au point fixe I, qui est séparé de E par la largeur a de la lumière. Qu'on transporte les points i et I d'une longueur l vers e : le mouvement relatif ne changera pas, mais i se confondra avec le point t, qui précédemment figurait le bord e ; après ce transport, I est en I_1, ayant dépassé E d'une longueur $l - a$, égale à l'excès de la largeur de la bande du tiroir sur celle de la lumière.

On voit alors que le point t (c'est-à-dire le bord intérieur i du tiroir) passe sur I_1 quand le rayon OT vient en OT_3 et en OT_5 ; la position OT_3 marque le commencement de l'*échappement anticipé*, et OT_5, la fin de l'*échappement* : la séparation de ces deux périodes a lieu lorsque le piston est

à fond de course ; à ce moment OT passe en OT'_1, diamétralement opposé à OT_1.

Le déplacement du même point t sur le diamètre T'T'' montre comment la distribution se fait sur l'autre face du piston, si on lui fait représenter successivement les bords e' et i' du tiroir : il faut pour cela supposer les points fixes E' et I' déplacés vers E respectivement de la longueur du tiroir, $l + L + l'$ et de la longueur $l + L$.

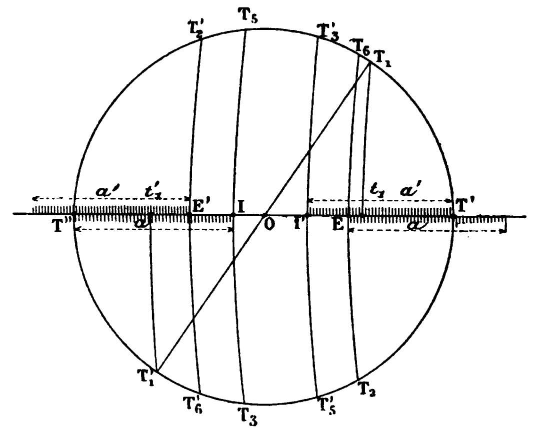


Fig. 49. — Épure du déplacement du tiroir sur les lumières.

Sur la face du piston voisine de l'arbre : T_1 T_2, parcours angulaire pendant l'admission ; — T_2 T_3, détente ; — T_3 T'_4, échappement anticipé ; — T'_4 T_5, échappement ; — T_5 T_6, compression ; — T_6 T_1, admission anticipée. Les lettres avec accents s'appliquent à l'autre face du piston.

En résumé, toute l'étude de la distribution revient à suivre sur le diamètre T'T'' le mouvement du point t, projection de T suivant un arc de cercle, dont le rayon est la longueur de la barre, et qui coupe normalement ce diamètre.

Sur ce diamètre T'T'' sont marqués quatre points fixes EIE'I' (fig. 49) : le passage du point mobile t sur ces repères indique le commencement et la fin des diverses phases de la distribution : et la distance de t à ces repères montre à chaque instant la largeur des ouvertures données par le tiroir.

La distance EI de la figure 49 est égale à $l - a$, excès de la largeur l de la bande du tiroir sur la largeur a de la lumière : lorsque cette bande recouvre la lumière, elle la dépasse de deux quantités dont la somme est constante et égale à cette différence $l - a$. En précisant une position spéciale du tiroir, on peut définir séparément chacune de ces quantités dont la somme égale $l - a$: c'est ce qu'on nomme le *recouvrement extérieur* et le *recouvrement intérieur* du tiroir : cette définition séparée n'est pas indispensable, car il suffit de considérer la *somme* de ces deux longueurs. De même E'I' est égal à la différence, $l' - a'$, des largeurs de l'autre bande et de l'autre lumière, ou à la somme des recouvrements de cette seconde bande.

Sur le diamètre T'T'', I I', d'après la construction, est égal à la différence de la distance A des bords intérieurs des lumières et de la distance L des bords intérieurs du tiroir : cette différence est la somme des *recouvrements intérieurs* du tiroir. L peut être plus grand que A, alors le tiroir ne peut recouvrir à la fois, vers l'intérieur, les deux lumières : on dit qu'il a des *recouvrements intérieurs négatifs* ou des *découverts;* sur le diamètre T'T'', le point I passe à droite du point I'.

Enfin la distance du point E à la position initiale t_1 du point t est l'*avance linéaire* correspondante du tiroir, ε. L'avance linéaire pour l'autre côté du piston, ε', égale à $E't'_1$ (fig. 49) et se déduit des dimensions qui viennent d'être indiquées.

On voit que les éléments essentiels, qui précisent les phases d'une distribution, se réduisent aux suivants :

Le rayon d'excentricité, r;

L'angle d'avance, δ;

La longueur de la barre d'excentrique, qui fixe le rayon de l'arc projetant Tt;

La somme des recouvrements sur chacune des bandes du tiroir ;

La somme des deux recouvrements intérieurs ;

L'avance linéaire du tiroir à l'un des fonds de course du piston, ε ou ε'.

Il est inutile de donner séparément les deux recouvrements extérieurs et les deux recouvrements intérieurs, ce qui exige qu'on suppose le tiroir placé dans une position spéciale, peu intéressante, d'ailleurs, à considérer, et qu'on ne définit très clairement que lorsque le tiroir est symétrique comme les lumières, cas d'ailleurs fréquent.

En ajoutant sur le tracé (fig 49), à partir des quatre points fixes, les largeurs *a* et *a'* des lumières, on fait voir directement, dans chaque position du point mobile *t*, les dimensions des ouvertures.

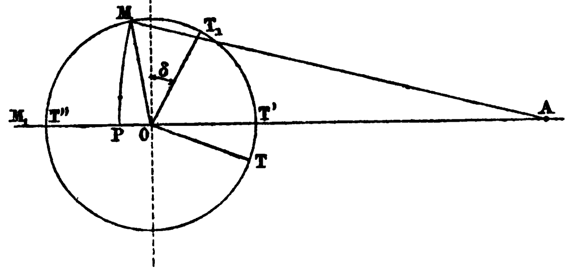


Fig. 50. — Mouvements corrélatifs du piston et du tiroir : la manivelle motrice OM suit la manivelle du tiroir, OT, à distance angulaire invariable, égale à $90^\circ + \delta$.

Les phases de la distribution sont ainsi rapportées aux positions de la manivelle du tiroir, ou du rayon d'excentricité; on en déduit les positions correspondantes du piston, qu'il faut connaître pour se rendre compte du travail exercé par la vapeur. Sur les coupes perpendiculaires à l'arbre de la machine, la manivelle motrice se projette suivant un rayon OM (fig. 50), qui suit à distance angulaire constante, $90^\circ + \delta$, le rayon OT de l'excentrique. Le rayon R de la manivelle motrice est presque toujours plus grand que le rayon d'excentricité, *r* : mais, pour simplifier les tracés, on peut supposer ces rayons égaux, ce qui revient à un simple changement d'échelle pour l'un d'eux.

Pour une position quelconque de OT, il faudrait donc tracer OM tel que l'angle MOT fût égal à 90° + δ, puis la bielle motrice MA. Le mouvement de A est le même que celui du piston. On peut encore transporter ce point A dans l'intérieur du cercle OM, comme on l'a fait pour le tiroir, en

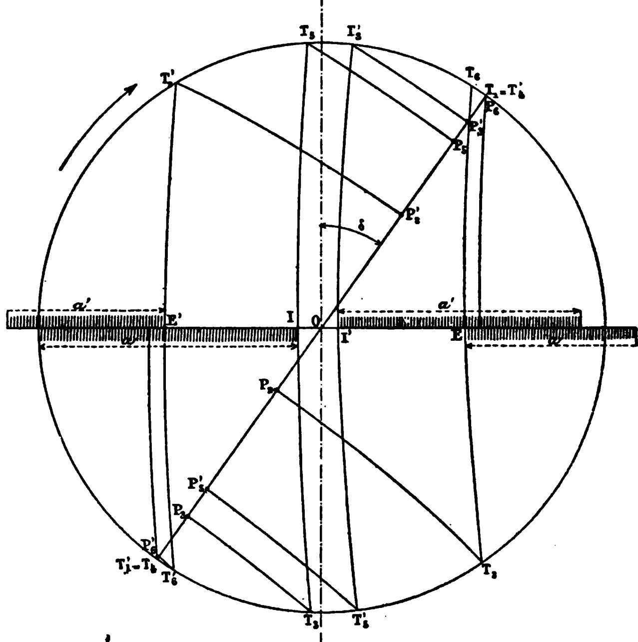


Fig. 51. — Tracé des positions correspondantes du tiroir et du piston au début des diverses phases de la distribution : le mouvement du tiroir se projette sur le diamètre horizontal, celui du piston sur le diamètre T_1 T'_1.

traçant l'arc de cercle MP de rayon AM, ou en *projetant circulairement* M sur T'T'' à l'aide d'un rayon égal à la longueur de la bielle motrice : ce rayon subira la même transformation d'échelle que la manivelle OM.

Il est évident qu'on simplifiera les tracés, si, au lieu de mener tous ces rayons OM à la distance angulaire 90° + δ en

arrière de OT, on suppose qu'on fasse tourner de cet angle $90° + \delta$ vers OT, une fois pour toutes, le système des rayons OM, ainsi que le diamètre T'T''. OM se confond alors avec OT et doit se projeter sur le diamètre T_1T_4 (fig. 51) ; on n'aura plus qu'à mener l'arc de cercle projetant TP ; le mouvement de P sur le diamètre T_1T_4 sera précisément celui du piston entre ses fonds de course.

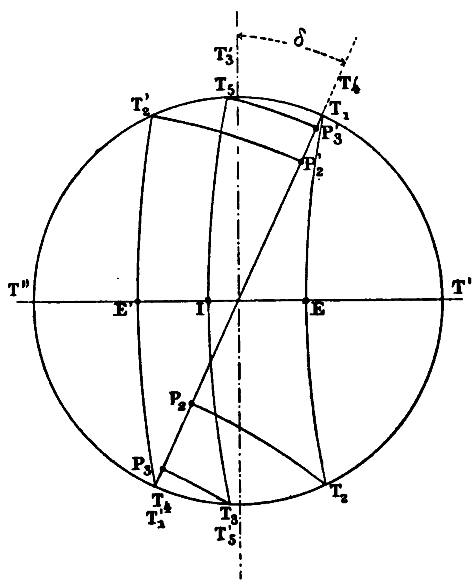


Fig. 52. — Distribution sans avances linéaires ni recouvrements intérieurs, avec parcours égaux du piston pendant les phases d'échappement anticipé et de compression ($P_3T_4 = P'_3T_1$).

Ces tracés permettent d'apprécier les diverses distributions que peut donner un tiroir conduit par un excentrique. Pour simplifier cette recherche, on supposera d'abord, comme cela existe parfois, que les avances linéaires, ε et ε', sont nulles, ainsi que la somme des recouvrements intérieurs ($L = A$). En choisissant l'angle δ d'avance, on fixe le diamètre T_1T_4. Puisque ε et ε' sont nuls, les points fixes E et E'

sur le diamètre T'T'', doivent coïncider (fig. 52) avec les projections circulaires de T_1 et de T_4. D'après la seconde hypothèse, les points I et I' se confondent : on pourra les placer de manière que les longueurs P_3T_4, et P'_3T_1 soient égales : alors les périodes d'échappement anticipé et de compression correspondent à des parcours égaux du piston, les points P_3 et P_5', P_3' et P_5 se confondant.

Pendant les admissions sur les deux faces du piston, la manivelle parcourt deux angles égaux : mais l'égalité n'existe pas pour les parcours du piston : T_1P_2 est plus petit que $T_1'P_2'$, puisque la courbure des arcs projetants, T_2P_2, $T_2'P_2'$, réduit le parcours T_1P_2, correspondant à la face du piston qui regarde l'arbre, et allonge le parcours, $T_1'P_2'$, pour l'autre face. Plus le rayon projetant est petit, ou plus le rapport des longueurs de la bielle et de la manivelle est faible, plus cette différence est marquée.

Par contre, l'ouverture de la lumière est un peu plus grande pour le côté qui a la plus courte admission, à cause de la courbure de l'arc projetant T_1E, $T_1'E'$: elle est ET' pour le côté qui regarde l'arbre, E'T'' pour l'autre. La courbure de cet arc est d'ailleurs habituellement bien moindre que celle de l'arc TP, la bielle du tiroir étant, par rapport à sa manivelle, plus longue que la bielle motrice. Dans les machines rapides, le laminage sera moindre du côté de la plus grande ouverture, qui correspond au plus faible parcours du piston, ce qui rapproche de l'égalité le travail moteur sur les deux faces du piston.

Plus l'angle d'avance δ sera grand, plus les parcours du piston, pendant l'admission, T_1P_2 et $T_1'P_2'$, diminueront; mais, par contre, les parcours P_3T_4 et P_5T_1 (ou P'_3T_1), pendant l'échappement anticipé et la compression, augmenmenteront; en outre, les ouvertures les plus grandes des lumières, ET' et E'T'', se restreindront. On ne peut donc obtenir de courtes admissions qu'avec de longs échappements anticipés et de longues compressions, et de faibles ouvertures des lumières pour l'entrée de la vapeur.

L'examen des effets des *avances linéaires* et des *recouvrements intérieurs* complète ce premier aperçu.

Les *avances linéaires* (ε et ε') allongent les périodes d'admission, qui ne cessent plus quand le point t repasse en t_1 et en t'_1; elles augmentent d'autant la plus grande ouverture des lumières. Dans les machines rapides, elles assurent l'établissement de la pression de la chaudière dès le début de l'admission proprement dite. Inversement, elles peuvent remédier quelque peu à un excès de compression, en permettant à la vapeur trop comprimée de refluer dans la boîte à vapeur ; le terme *admission anticipée,* qui indique une circonstance géométrique de la distribution, n'est plus alors effectivement exact.

En donnant au tiroir, pour la lumière la plus voisine de l'arbre, une avance linéaire (ε), plus grande que pour l'autre lumière (ε'), on augmente le parcours T_1P_2 plus que $T'_1P'_2$, et on rapproche de l'égalité les deux parcours du piston pendant l'admission sur les deux faces. En même temps, la différence entre les plus grandes ouvertures des deux lumières augmente.

Dans les petites machines, on se contente souvent du réglage à *avances linéaires égales,* facile à réaliser par tâtonnements : on modifie sur place la longueur de la tige du tiroir, jusqu'à ce qu'il donne effectivement, pour les deux côtés du cylindre, des avances égales, qu'on observe en faisant tourner l'arbre après avoir démonté le plateau de la boîte à vapeur.

L'effet des *recouvrements intérieurs* est évident sur les figures. A mesure que les longueurs EI et E'I' augmentent, les périodes d'*échappement anticipé*, P_3T_4 et $P'_3T'_4$ (fig. 51) se réduisent, mais celles de *compression*, P_5P_6 et $P'_5P'_6$, deviennent plus longues. On peut, au contraire, diminuer les compressions, en rapprochant I de E et I' de E', mais on augmente les parcours d'échappement anticipé.

Une étude approximative des positions du tiroir et du piston suffit souvent : on peut alors négliger la courbure

des arcs de cercle T*t* et TP et les remplacer par des droites perpendiculaires à T″T″ et à T_1T_4. L'erreur ainsi commise, parfois minime pour le tiroir, est presque toujours assez importante pour le piston. Cette simplification est commode dans les études générales et rapides, mais, pour une application pratique, on doit préférer les tracés précis, qui sont faciles.

On voit sur les épures que la longueur $l - a$, ou la somme des recouvrements d'une bande, portée en EI (fig. 51) a une influence capitale, mais que la largeur même de la lumière, a, n'a pas d'importance pour les tracés. Toutefois, l'épure montre que la plus grande ouverture possible est ET′ (fig. 49), pour l'admission, IT″ pour l'échappement ; IT″ est habituellement plus long de ET′ : la largeur a devra donc être au moins égale à ET′ ; elle serait ainsi suffisante pour l'admission, mais souvent trop petite pour l'échappement ; d'autre part il est inutile de la prendre supérieure à IT″. De même, la largeur de l'autre lumière, a', sera comprise entre E′T′′ et I′T′. On prend souvent une valeur commune de a et de a' un peu inférieure au maximum IT′ ou I′T″.

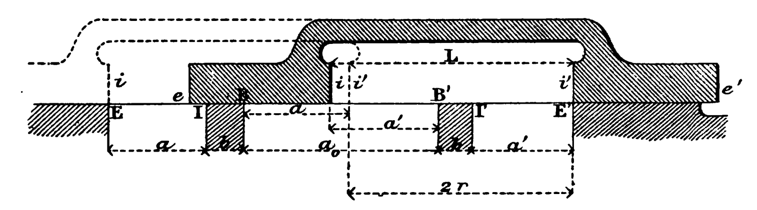


Fig. 53. — Détermination de la largeur a_0 de la lumière centrale : le tiroir, à fond de course vers la gauche, doit laisser une ouverture *i*B′ égale à I′E′.

Pour déterminer la largeur a_0 de la lumière centrale, on remarque que, lorsque le tiroir, à l'un de ses fonds de course, ouvre en grand à l'échappement une des lumières extrêmes, il ne faut pas que la bande qui dessert l'autre lumière extrême (fig. 53) vienne recouvrir une fraction trop grande de la lumière centrale : il convient que la largeur

du passage iB' soit toujours égale au moins à l'ouverture donnée sur E'I', c'est-à-dire généralement à la largeur même a'. De même le bord i' du tiroir ne doit pas trop approcher du bord B ; il convient qu'il laisse toujours un vide égal au moins à a.

De la figure 53, on déduit la relation :

$$a_0 = a + a' + 2r - L.$$

Les proportions des appareils sont toujours telles que le bord e ne puisse jamais dépasser le bord B, ce qui laisserait fuir la vapeur qui remplit la boîte à tiroir. Cette disposition vicieuse ne se produirait qu'avec des lumières beaucoup trop étroites pour la course du tiroir.

Dans tous ces tracés ne figure pas la hauteur h des lumières : on fixe cette hauteur de manière à obtenir une section suffisante de lumière $a \times h$: toutefois les convenances de construction ne permettent guère que cette hauteur dépasse beaucoup le diamètre du cylindre.

Souvent on se contente de règles empiriques simples pour proportionner les orifices de passage : on suppose le piston animé de sa *vitesse moyenne*, qui est égale, en m par seconde, à $\frac{4Rn}{60}$, R étant le rayon de la manivelle motrice, en mètres, et n le nombre de tours par minute ; on en déduit la vitesse de la vapeur, comme s'il n'y avait aucune condensation ni aucune contraction de la veine fluide, au moment de la plus grande ouverture pour l'admission. On proportionne les ouvertures pour que cette vitesse fictive de la vapeur ait une valeur qu'on choisit, suivant la nature des machines, entre 25 et 60 m par seconde[1].

L'axe du mouvement du tiroir n'est pas toujours parallèle à l'axe du cylindre ; les deux axes peuvent faire un angle α. On ramène immédiatement cette disposition à celle qui a été

[1] Par exemple, si le piston parcourt en moyenne 4 m par seconde et si on admet pour la vapeur la vitesse, 12 fois plus grande, de 48 m par seconde, la section de la lumière ouverte à l'admission devra être 1/12 de la surface du piston.

étudiée, en supposant qu'on rétablisse le parallélisme en faisant tourner de l'angle α l'axe du tiroir avec sa manivelle, ainsi que la table des lumières. On détermine alors le véritable angle d'avance δ ; la manivelle du tiroir fait en réalité, avec la manivelle motrice, l'angle $90^\circ + \delta - \alpha$.

Un *balancier de renvoi* est parfois employé pour la commande d'un tiroir dont l'axe est parallèle à celui du cylindre, sans être dans le plan déterminé par cet axe et par l'axe de l'arbre. On peut alors considérer le tiroir comme retourné bout pour bout et l'excentrique doit être calé à 180° de sa position normale. Sur le diagramme fondamental (fig. 49) les points E et I sont alors les bords de la lumière la plus éloignée de l'arbre. Le balancier modifie quelque peu le mouvement du tiroir : il renverse l'effet des obliquités de la barre d'excentrique ; avec l'égalité des avances linéaires sur les deux côtés, la plus grande ouverture des lumières est moindre du côté où la période d'admission correspond à un plus petit parcours du piston. Ces causes d'inégalité s'ajoutent ; elles ne se compensent plus en partie de manière à ramener vers la même valeur le travail sur les deux faces du piston.

Pour se rendre compte des ressources qu'offre la distribution simple par tiroir, avec les différentes valeurs de l'avance angulaire, δ, on néglige d'abord les effets de l'obliquité des bielles, puis on considère un tiroir sans avances linéaires ni recouvrements intérieurs. Dans ce cas, avec un angle d'avance nul, l'admission a lieu pendant tout le parcours du piston : on a une distribution sans détente, usitée dans quelques appareils à vapeur, tels que les *servo-moteurs*, et appliquée aux moteurs hydrauliques. Avec une petite avance angulaire, jusque vers 20°, l'admission dure encore pendant presque toute la course. Une avance de 20° à 40° donne des périodes d'admission pendant plus de la moitié de la course totale du piston. Avec des avances de 40° à 60°, l'admission diminue, mais les périodes d'échappemeni anticipé et de compression augmentent notablement. Elles

deviennent excessives pour des avances supérieures à 60°.

Par l'addition de recouvrements intérieurs au tiroir, on augmente la détente aux dépens de l'échappement anticipé, mais on allonge aussi la période de compression. Le découvert intérieur produit des effets inverses.

Le seul examen de la longueur géométrique des phases ne donne pas une idée suffisante d'une distribution: les *laminages* de vapeur y ont une action fort importante, surtout dans les machines rapides. La fermeture graduelle de l'orifice ouvert à l'admission, et l'ouverture graduelle de l'orifice d'échappement, allongent en réalité la période de détente aux dépens de celles d'admission et d'échappement anticipé. Cela permet souvent d'obtenir une détente convenable de la vapeur avec des avances de 40° environ. Le laminage à l'admission devient même souvent assez fort pour qu'il soit bon de le réduire quelque peu en diminuant la longueur totale des tiroirs, ce qui leur donne des avances linéaires; on augmente ainsi l'ouverture des lumières.

La fermeture graduelle de l'orifice d'échappement augmente la compression; mais il faut remarquer que, si le tiroir donne une assez grande période de compression, il entraîne aussi pour le cylindre de vastes espaces libres dans lesquels la vapeur se comprime.

C'est ainsi que les divers inconvénients qu'entraîne la distribution par excentrique et tiroir, tels que laminages de vapeur, grands espaces libres, forte compression, se combinent de manière à se compenser en partie. En outre, la résistance offerte par la compression évite le changement brusque des efforts sur le piston.

Le tiroir est habituellement monté avec un déplacement possible dans une direction perpendiculaire à la table des lumières, déplacement qui le maintient collé sur la table malgré l'usure, et en permet au besoin le soulèvement. Dans les petites machines, il est souvent pris dans un cadre forgé avec la tige, ou relié à la tige qui traverse un logement ménagé dans le métal. Lorsque le tiroir ne repose pas

sur une table horizontale, de petits ressorts le maintiennent appliqué, quand l'arrivée de vapeur est interrompue.

47. Formes diverses de tiroirs. — Certaines modifications des tiroirs n'entraînent aucun changement des phases de la distribution, qu'on étudie à l'aide des tracés géométriques exposés au paragraphe précédent.

Dans les grands cylindres, il devient difficile d'obtenir, avec le tiroir ordinaire, des ouvertures suffisantes. Qu'on suppose par exemple deux machines semblables, la seconde avec des dimensions doubles de celles de la première, faisant le même nombre de tours par minute. Les ouvertures de la seconde, deux fois plus larges et deux fois plus hautes, seront quatre fois plus grandes; mais le volume à remplir de vapeur sera huit fois plus grand. Par conséquent, le tiroir, convenable pour la première machine, ne suffit plus pour la seconde.

On pourrait, il est vrai, donner plus de largeur aux lumières, en augmentant proportionnellement la course du tiroir. Mais, surtout avec les coulisses souvent employées pour conduire les tiroirs, il n'est pas commode de leur donner de grandes courses.

Quelquefois on applique contre le cylindre deux tiroirs, jouant chacun sur une table différente.

Avec le tiroir à doubles orifices (fig. 54), souvent employé dans les machines marines, les sections de passage, pour l'admission et pour l'échappement, sont deux fois plus grandes. Les lumières extrêmes du cylindre sont dédoublées. Des quatre ouvertures rectangulaires ajoutées sur la face frottante du tiroir, les deux plus voisines de la cavité centrale sont en communication constante avec la boîte à vapeur : la largeur n'a pas besoin d'en être plus grande que la fraction de la lumière du cylindre découverte pour l'admission lorsque le tiroir est à fond de course; les deux ouvertures extrêmes du tiroir sont en communication constante avec l'échappement, comme la cavité centrale. Quant à la

largeur de la bande ménagée entre les lumières dédoublées du cylindre, elle est assez grande pour ne jamais quitter la barrette qui sépare les deux ouvertures voisines du tiroir.

On diminue le volume des espaces libres en faisant déboucher les lumières d'admission sur la table près des fonds du cylindre ; mais ces lumières se trouvent alors éloignées l'une de l'autre, et le tiroir devrait avoir une longueur démesurée. On le coupe en deux, en pratiquant deux lumières d'échappement, et on a deux *tiroirs solidaires* au lieu d'un seul.

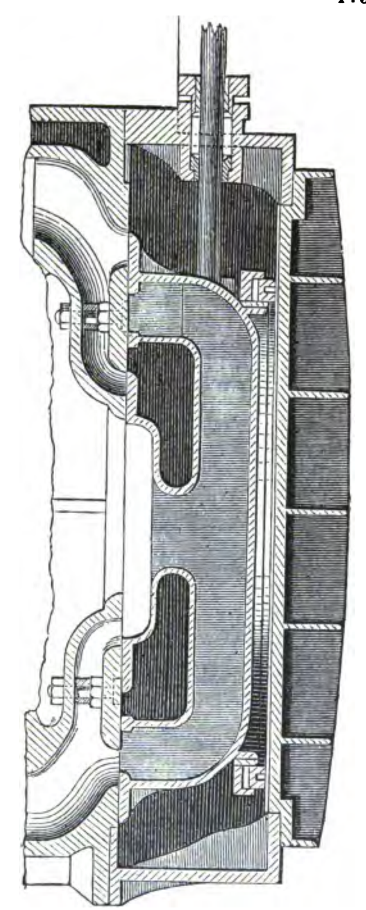


Fig. 54. — Tiroir à doubles orifices et à compensateur du « Great Eastern », construit en 1859. La vapeur de la chaudière occupe l'espace couvert de grosses hachures verticales. Le compensateur, porté par le tiroir et frottant sur le plateau de la boîte à vapeur, soustrait à la pression une partie de la surface du tiroir.

Le tiroir *à canal* ou tiroir de *Trick* (fig. 55) augmente les sections de passage pour l'admission de vapeur. Au moment de l'ouverture de l'admission ou du contact des bords E et *e*, le bord e_1 du canal coïncide avec le bord E_1 de la partie dressée de la table, bord dont la position rigoureuse, indifférente avec le tiroir ordi-

naire, devient ici obligatoire. Dès que le tiroir avance, la vapeur pénètre dans la lumière non seulement directement, mais aussi par le canal : c'est comme si, au début de l'admission, le tiroir marchait deux fois plus vite. La même action se produit avant la fermeture de la

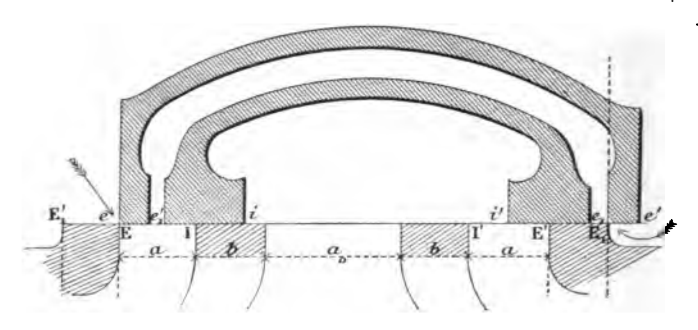


Fig. 55. — Tiroir de Trick, à canal, doublant les sections de passage au début et à la fin de l'admission.

lumière d'admission. L'échappement se fait sans modification. Le canal unique du tiroir fonctionne de même lors de l'ouverture de la lumière de droite : alors le bord e'_1 vient coïncider avec le bord E'_1 de la table. Quand on substitue à un tiroir ordinaire le tiroir à canal, il paraît logique de réduire l'étendue des périodes d'admission anticipée, en diminuant les avances linéaires.

Les dimensions sont déterminées de sorte que le canal ne vienne jamais communiquer avec la lumière d'échappement, et ne mette pas en relation les deux côtés du cylindre, ce qui arriverait si les deux bouts du canal pouvaient communiquer en même temps avec les deux lumières extrêmes du cylindre[1]. Ces conditions obligent à rapprocher beaucoup

[1] Quelquefois, au contraire, on dispose le canal pour établir pendant un instant cette communication, un peu avant le commencement de l'échappement anticipé sur une face du piston et de la compression sur l'autre face, afin de faire passer un peu de vapeur du côté où elle sera comprimée et d'augmenter ainsi la compression.

les ouvertures du canal des bords extérieurs des tiroirs et à les faire très étroites.

Les tiroirs plans sont appuyés contre la table par une force souvent très grande, qui dépend de leur surface et des pressions de la vapeur. Cette force varie un peu avec la position du tiroir, car l'étendue de la surface inférieure, en contact avec la vapeur d'échappement, varie, ainsi que la pression dans la lumière extrême du cylindre recouverte par le tiroir. Mais on évalue approximativement, et, par excès, la charge du tiroir en en multipliant la surface totale (produit de la longueur par la hauteur) par la différence des pressions à l'admission et à l'échappement. La surface de portée du tiroir sur la table doit être assez grande pour que la charge ne dépasse guère 30 kg par cm^2.

De cette charge résulte un frottement, qui dépend de l'état des surfaces et la nature du graissage, et un travail qui disparaît par suite du frottement. Ce travail est non seulement perdu, mais encore nuisible, car il produit l'usure des surfaces frottantes et même des avaries par grippement. Il en résulte aussi une fatigue des mécanismes de distribution.

On réduit le frottement au moyen du *compensateur*, fort usité dans les machines marines. L'extérieur du tiroir porte une face plane (fig. 56), sur laquelle vient porter une couronne fixée dans le plateau qui ferme la boîte à vapeur. Cette couronne est appuyée contre le tiroir par des ressorts qu'on peut régler à l'aide de vis, de manière à exercer une pression convenable pour un bon contact et à racheter l'usure. Le joint entre le compensateur et le plateau doit être étanche. On isole ainsi une portion de la surface du tiroir, qu'on soustrait à la pression de la boîte à vapeur, en mettant en communication avec l'échappement l'espace circonscrit par le compensateur, à l'aide d'un trou percé dans le dos du tiroir, ou mieux d'une ouverture dans le plateau et d'un tuyau muni d'un robinet, qui permet de supprimer cette communication en cas de fuites anormales.

La surface ainsi isolée doit être déterminée de telle sorte

que, dans toutes les positions du tiroir, il y ait toujours une force assez grande qui l'applique sur la table ; si cette surface est trop étendue, le tiroir risque de se soulever par moments et de laisser fuir la vapeur. En général la portion soustraite à la pression ne dépasse pas les 5 à 6 dixièmes de la surface totale du tiroir.

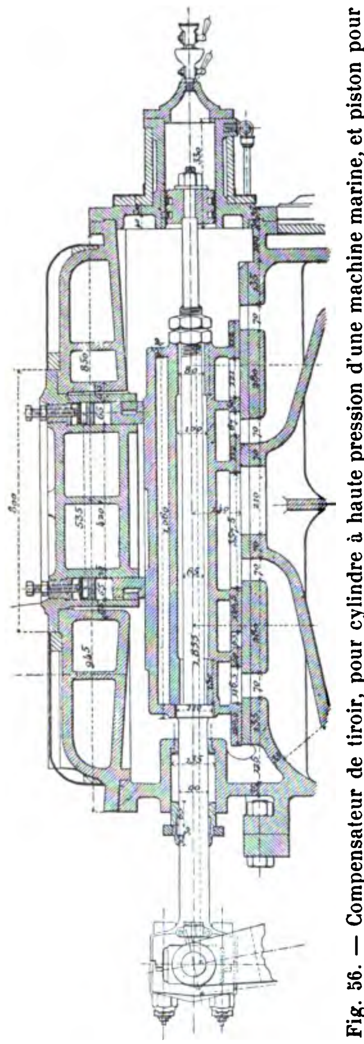


Fig. 56. — Compensateur de tiroir, pour cylindre à haute pression d'une machine marine, et piston pour l'équilibre du poids des pièces; coupe suivant l'axe du tiroir. Le compensateur, monté dans le plateau de la boîte à vapeur, porte sur le dos du tiroir, dont il soustrait une partie à la pression de la vapeur. Le piston, monté à la partie supérieure de la tige, et pressé constamment par la vapeur sur sa face inférieure, équilibre le poids du tiroir, dont l'axe est vertical.

Le compensateur est aussi fixé sur le dos du tiroir et frotte contre une face plane du plateau (fig. 54).

Parfois on rattache la partie frottante du compensateur au tiroir par une lame d'acier flexible (fig. 57).

En ouvrant complètement le dos du tiroir sous le compensateur, et en plaçant un conduit d'échappement en regard de cette ouverture (fig. 57), on peut supprimer la lumière d'échappement, de forme assez

compliquée fondue, avec le cylindre. Tel est le *tiroir à dos percé*, quelquefois employé (fig 57).

C'est surtout dans les grandes machines que le compensateur est utile. Pour les petites machines, c'est une complication qui augmente les frais de réparation, et si l'entretien n'est pas très soigneusement fait, l'appareil donne lieu à des fuites de vapeur importantes.

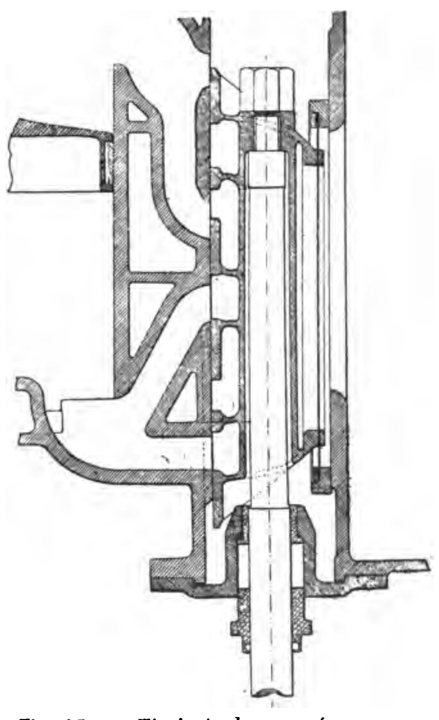


Fig. 57. — Tiroir à dos percé, avec doubles orifices et compensateur à lame flexible, construit par A. Normand. Des cinq lumières du tiroir, les deux extrêmes et la lumière centrale servent à l'échappement et communiquent avec l'ouverture du plateau, isolée par le compensateur; les deux autres donnent une admission supplémentaire.

On réduit plus complètement le frottement par l'emploi du *tiroir-piston* ou tiroir *cylindrique*. La boîte à vapeur devient un cylindre où se meuvent deux pistons solidaires (fig. 58), conduits par la tige du tiroir. Ces pistons se déplacent sur deux lumières annulaires. La vapeur est admise de part et d'autre de ces deux pistons; l'échappement se fait entre eux. Ces pistons solidaires distribuent la vapeur exactement comme le tiroir ordinaire. Les lumières annulaires sont coupées par une série de barrettes pleines, qui maintiennent les pistons et empêchent qu'ils n'accrochent les bords. Les

pressions de la vapeur se compensent exactement sur ces pistons (à la surface de la tige de commande près).

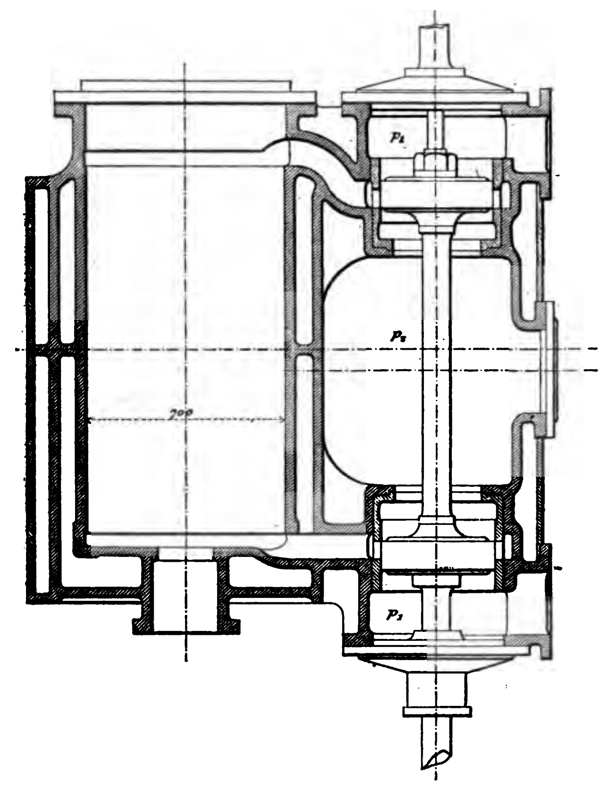


Fig. 58. — Cylindre avec tiroir cylindrique : admission de vapeur par les bords extérieurs, en p_1; échappement par les bords intérieurs, en p_2.

Chaque piston est muni d'une bague fendue élastique, de longueur convenable, qui tend à frotter contre la surface cylindrique alésée : un couvre-joint à téton, rapporté dans l'interieur de la bague, rend la coupure à peu près étanche. Souvent aussi on emploie, sur chaque piston, deux bagues

élastiques étroites séparées par une bague non fendue qui en maintient l'écartement. De petits ressorts d'acier, placés à l'intérieur des bagues, tendent à les faire ouvrir.

On a même quelquefois construit des pistons distributeurs sans bagues, montés à frottement doux dans leur cylindre : il paraît difficile que ces pièces soient suffisamment étanches.

La pression de la vapeur dans les lumières des cylindres, quand elles sont recouvertes par le tiroir cylindrique, tend à resserrer les bagues, c'est-à-dire à les écarter de la surface sur laquelle elles doivent porter : des fuites en résulteraient. Pour éviter ce défaut, il est bon de disposer le tiroir pour que la vapeur à la pression supérieure puisse pénétrer à l'intérieur des bagues et les appuyer contre la table cylindrique, en ajoutant son action à celle des ressorts. Le tiroir ainsi disposé donne lieu à un certain frottement.

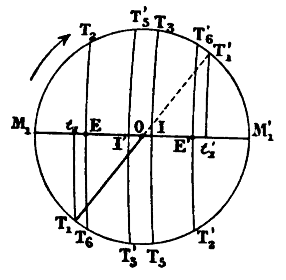


Fig. 59. — Épure de la distribution par tiroir à bords intervertis.

Face du piston regardant l'arbre : $T_1 T_2$, parcours angulaire du centre de l'excentrique ; — $T_2 T_3$, détente ; — $T_3 T_5$, échappement anticipé et proprement dit ; — $T_5 T_6$, compression ; — $T_6 T_1$, admission anticipée. Les mêmes lettres avec accent s'appliquent à la distribution sur l'autre face du piston.

On peut intervertir les côtés d'admission et d'échappement des tiroirs cylindriques, en faisant pénétrer la vapeur d'admission entre les deux pistons, et faisant communiquer avec l'échappement les deux faces extérieures, à condition d'intervertir les recouvrements du tiroir et de déplacer de 180° le rayon de l'excentrique qui les conduit. La figure 59 donne dans ce cas l'épure des positions du tiroir au début des phases de la distribution.

Quand l'admission se fait par les bords intérieurs du tiroir, un conduit unique amène la vapeur au milieu du cylindre. Les doubles conduits d'admission ou d'échappe-

ment ne sont, du reste, jamais nécessaires : il suffit de réunir les deux pistons solidaires du tiroir cylindrique par une tige creuse (fig. 60).

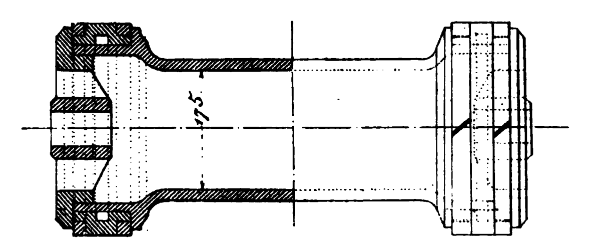


Fig 60. — Tiroir cylindrique à tige creuse.

Dans les grandes machines pilon, il est utile d'équilibrer le *poids du tiroir* au moyen d'un piston, constamment poussé de bas en haut par la vapeur (fig. 56), le haut du cylindre où joue ce piston étant en communication avec l'échappement. Une différence sur les diamètres des deux pistons, qui composent un tiroir cylindrique, en équilibre plus simplement le poids. Comme en général ce tiroir doit pouvoir être démonté par le haut, il faut alors que l'admission se fasse entre les deux pistons, c'est-à-dire par les bords intérieurs.

En exagérant la force qui tend à soulever constamment le tiroir, on réduit l'effort que doit transmettre le mécanisme de commande pendant la course ascendante : alors ce mécanisme travaille plus en tirant le tiroir qu'en le poussant, ce qui est une condition favorable pour un système formé de tiges longues et minces.

48. Coulisse de Stephenson. — La distribution simple par excentrique et tiroir ne convient que pour les machines dont l'arbre doit tourner toujours dans le même sens. Souvent, au contraire, il est nécessaire que la rotation s'effectue à volonté dans un sens ou dans l'autre.

Soit OT (fig. 61) le rayon d'excentricité qui donne une

distribution convenable pour un sens de rotation, qu'on appellera marche *avant;* OT est calé à $90^\circ + \delta$ *en avant* de la manivelle motrice OM_1, dans le sens de cette rotation. Soit OT′ le même rayon d'excentricité, correspondant à un excentrique calé avec le même angle $90^\circ + \delta$ *en arrière* de OM_1; ce second excentrique donnerait la même distribution pour une rotation en sens contraire de l'arbre ou marche *arrière*.

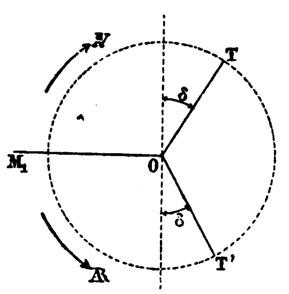


Fig. 61. — Excentriques pour marches avant et arrière.

On pourra donc obtenir les deux marches en employant deux excentriques, chacun conduisant sa bielle ou sa *barre*, à condition de relier la tige du tiroir à l'une ou l'autre de ces barres. On a employé à cet effet des mécanismes assez compliqués, jusqu'à ce que Stephenson eut imaginé la *coulisse*, construite dans l'année 1842. Les deux extrémités des barres d'excentriques sont réunies par une pièce dite *coulisse*, dans laquelle peut glisser un *coulisseau*, articulé sur la tige du tiroir, et ce mécanisme permet d'amener l'extrémité de l'une ou l'autre barre devant la tige du tiroir qu'elle doit commander.

La figure 62 montre les pièces réduites à leurs axes; OM_1 est la manivelle motrice; OT, OT′, sont les rayons des excentriques, de longueur r; TC, T′C′, les barres d'excentrique, de longueur l; CC′ est la coulisse; AB, la tige de tiroir, dont le point A est astreint à rester toujours sur la coulisse et sur la droite OB.

Réduit à ces éléments, le système serait déformable d'une infinité de manières : la coulisse est supportée par une *bielle de suspension* EJ, articulée en J, et à l'extrémité E d'un levier KE, fixé sur un arbre K dit *arbre de relevage*.

Quand on fait tourner cet arbre de manière à amener *E* en E_{AV}, le point C vient saisir le point A, et c'est l'excen-

trique OT qui conduit le tiroir. L'arbre de relevage est immobilisé dans cette position. Quand, au contraire, on fixe KE dans la position E_{AR}, c'est l'excentrique OT′ qui commande le tiroir. On obtient de la sorte les marches *avant* et *arrière* par la manœuvre de l'arbre de relevage.

Les barres d'excentriques sont parfois montées différemment (fig. 63), OT commandant l'extrémité inférieure de la coulisse, et OT′ l'extrémité supérieure. Les barres sont dites alors *croisées* ou *fermées :* dans la première disposition, elles sont *droites* ou *ouvertes*. Ces expressions ne désignent exactement la situation des barres que dans la position initiale considérée, car, après un demi-tour, les barres droites se coupent, et les barres croisées ne se coupent plus (fig. 64).

Fig. 62. — Coulisse de Stephenson à barres droites ; arbre de relevage dans ses positions moyenne et extrêmes.

La coulisse rend d'autres services que le simple changement de sens de la marche. Qu'on imagine le levier de l'arbre de relevage fixé dans une position intermédiaire KE (fig. 65), le point A se trouve en un point intermédiaire de la coulisse et le tiroir prend un mouvement dont on n'aper-

çoit pas immédiatement la loi. Ce mouvement, étant d'ailleurs absolument défini, peut être déterminé, soit par calculs, soit par épures, pour une série de positions de KE comprises entre KE_{AV} et KE_{AR}. On reconnaît alors que le mouvement du tiroir est assimilable, par approximation, à celui que lui donnerait un certain excentrique de rayon r et d'angle de calage δ, variables pour chacune des positions de KE. C'est ce qu'on appelle, dans chacune de ces positions, l'*excentrique fictif* du tiroir, qu'on pourrait substituer à la coulisse. La connaissance de l'excentrique fictif et des éléments invariables du tiroir définit la distribution.

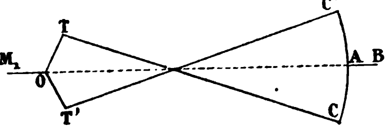


Fig. 63. — Coulisse de Stephenson à barres croisées.

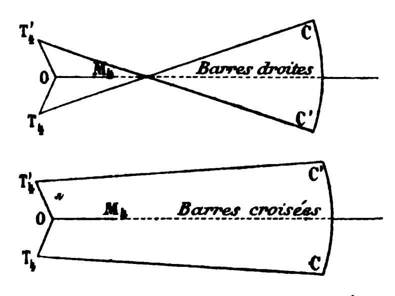


Fig. 64. — Barres après une rotation de 180°.

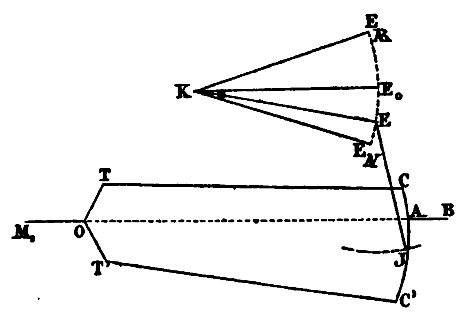


Fig. 65. — Tiroir conduit par un point intermédiaire de la coulisse.

Une règle commode (règle de Guinotte) donne les excen-

triques fictifs d'une coulisse : si le point A de la coulisse (fig. 66), menée par les deux excentriques OT et OT', conduit le tiroir, on obtient le rayon de l'excentrique fictif, OG, en joignant TT' et en prenant le point G qui divise TT' comme le point A divise la coulisse CC' : le rapport des longueurs $\frac{GT}{GT'}$ est égal au rapport $\frac{AC}{AC'}$. Les deux excentriques OT et OT' peuvent avoir des rayons et des angles de calage

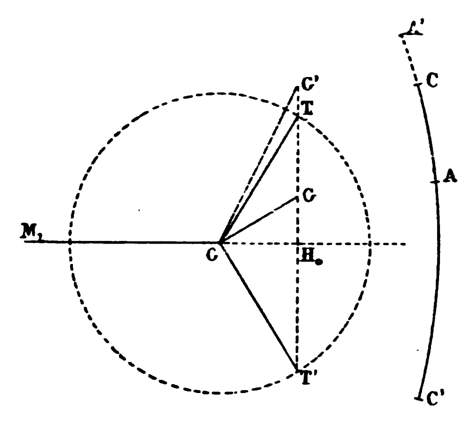


Fig. 66. — Excentriques fictifs de la coulisse de Stephenson : le point A de la coulisse donne à peu près la même distribution que l'excentrique fictif OG.

différents, et le point A peut être en dehors de CC', en A' par exemple : le rayon de l'excentrique fictif est alors OG'. En réalité, le coulisseau oscille un peu sur la coulisse pendant la marche, de sorte que le point A en représente la position moyenne; et la règle ne donne pas le mouvement du tiroir avec une exactitude complète, mais avec une approximation généralement suffisante pour étudier un avant-projet ou pour se rendre compte de la marche d'une machine.

Dans chaque cas, l'épure exacte seule peut faire connaître le degré de précision de la méthode, qui dépend de la relation entre les divers éléments du mécanisme.

Pour la coulisse de Stephenson ordinaire, avec deux excentriques OT, OT′, ayant même rayon et même angle de calage, la variation de l'excentrique fictif sera celle de OG, G allant de T à T′ (fig. 66). On obtient ainsi une première représentation approximative de la distribution : en considérant la marche avant, par exemple, on voit l'angle d'avance croître de δ à 90° : la période d'admission diminue depuis une certaine valeur initiale, tandis que les périodes d'échappement anticipé et de compression s'allongent.

On peut facilement pousser plus loin cette étude, sans arriver à la détermination exacte et complète de toute la distribution, en considérant certaines positions spéciales du tiroir, et surtout la position, particulièrement importante, du tiroir quand le piston est à fond de course : il laisse alors l'ouverture ε, dite *avance linéaire*. Cette avance ne doit jamais se transformer en *retard*, et ne doit pas dépasser un certain maximum à fixer dans chaque cas.

Il suffit de considérer la machine arrêtée avec la manivelle à ses *points morts*, ou le piston à ses fonds de course, ce qui fait deux positions différentes à examiner, et de voir comment le tiroir se déplace quand on manœuvre l'arbre de relevage. L'ouverture de la lumière d'admission, pour chacune des deux positions, est alors ce qu'on appelle l'avance linéaire. Pour que les avances linéaires, correspondant aux deux fonds de course, restent à peu près égales entre elles, il faut que le rayon de la coulisse soit égal à la longueur l des barres d'excentriques. Quand les barres sont *droites*, les avances linéaires augmentent à mesure qu'on fait commander le tiroir par un point plus voisin du milieu de la coulisse. Les plus grandes avances correspondent à l'arbre de relevage au *point mort*, expression qu'il ne faut pas confondre avec celle qui s'applique aux manivelles motrices : l'avance linéaire est alors la plus grande ouverture de la lumière d'admission.

Au contraire, quand la coulisse est commandée par des barres *croisées*, les avances linéaires diminuent à mesure

que l'arbre de relevage se rapproche de sa position moyenne.

Quand les barres sont droites, l'augmentation des avances linéaires, à mesure qu'on ramène l'arbre de relevage vers sa position moyenne, atténue la grande diminution de l'ouverture des lumières, qui résulte de la réduction de la course du tiroir. Dans les machines rapides, cette action peut être avantageuse.

Avec les barres croisées, au contraire, si l'avance linéaire est faible au début, quand l'arbre de relevage est à fond de course, elle disparaîtra quand l'arbre se rapprochera de sa position moyenne ; au point mort même, la lumière ne s'ouvrira plus du tout. Ce peut être un avantage si la coulisse ne sert que d'appareil de changement de marche, le tiroir étant toujours conduit par l'une ou l'autre extrémité de la coulisse : en mettant l'arbre de relevage à son point mort, on fera stopper la machine.

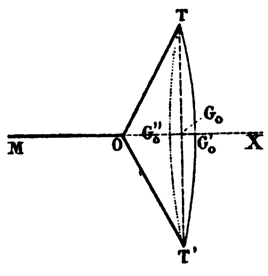


Fig. 67. — Centres des excentriques fictifs, avec barres droites ($TG_0'T'$) et barres croisées ($TG_0''T'$).

En tenant compte de cette variation des avances linéaires, on trace plus exactement les excentriques fictifs équivalents à une coulisse : avec les barres droites, les centres de ces excentriques forment l'arc d'une courbe telle que TG'_0T' (fig. 67) au lieu d'être placés sur la corde TT' ; la distance G'_0G_0 représente l'accroissement de l'avance linéaire pendant la manœuvre de l'arbre de relevage. Avec les barres croisées, les centres forment un arc tourné en sens inverse TG''_0T'.

La coulisse est suspendue à l'arbre de relevage par une bielle articulée en un point J, qui est placé soit au milieu de l'arc de la coulisse, soit à l'une des extrémités, en C ou C'. Ce point d'articulation décrit un arc de cercle autour de

l'extrémité du levier de suspension, E. Il convient que cet arc se rapproche autant que possible de la parallèle à l'axe OX' du tiroir, afin de réduire au minimum la petite oscillation continuelle du coulisseau A dans la coulisse.

Les figures 68 à 70 représentent quelques-unes des formes

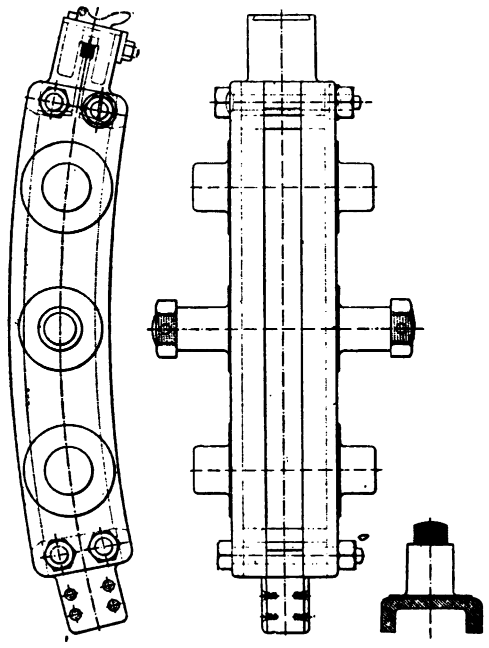


Fig. 68. — Coulisse de Stephenson à flasques, pour locomotive des chemins de fer de l'Ouest : élévations; coupe transversale d'une des flasques. L'*entretoise* supérieure d'une des flasques porte un godet graisseur, et l'entretoise inférieure un guide.

adoptées pour l'exécution des coulisses de Stephenson. Celle qui se rapproche exactement des tracés géométriques est la coulisse à deux flasques (fig. 68), reliées par des entretoises à leurs extrémités. Les axes d'articulation sont formés par des tourillons forgés avec les flasques; sur les tourillons extrêmes s'articulent les fourches qui terminent

les barres, et, sur ceux du milieu, la bielle de suspension, dédoublée en deux parties assez écartées pour laisser passer les fourches des barres ; on articule aussi la bielle de suspension sur l'une des paires extrêmes de tourillons.

L'extrémité de la tige du tiroir porte deux tourillons dont

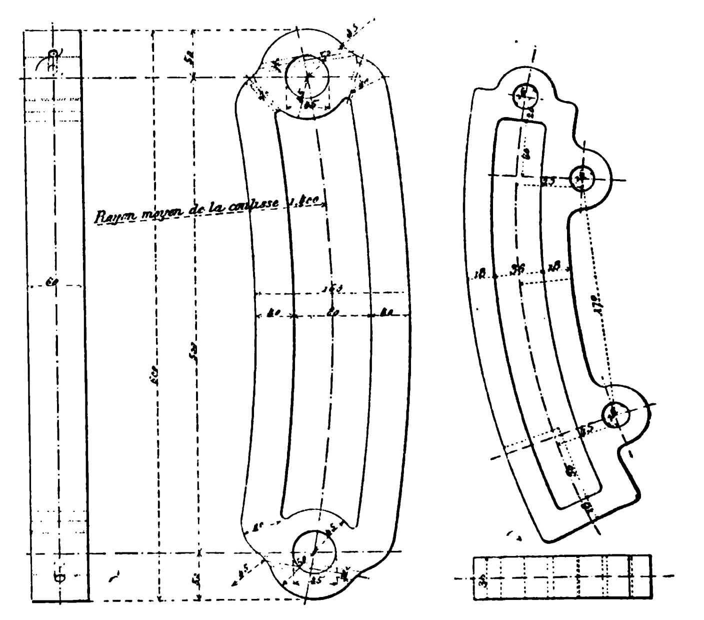


Fig. 69. — Coulisse de Stephenson découpée dans une pièce unique, pour distribution de locomotive.

Fig. 70. — Coulisse découpée à arc déporté.

l'axe correspond au point A de la figure 62; sur ces tourillons s'engagent deux coulisseaux, disposés pour glisser dans les flasques de la coulisse. On peut ainsi faire occuper au point A toutes les positions depuis l'articulation C de l'une des barres jusqu'à l'articulation C′ de l'autre.

Au lieu d'être creuses à l'intérieur pour recevoir le coulisseau, les deux flasques peuvent être à section rectangu-

laire, et le coulisseau porte des rebords extérieurs qui embrassent les flasques.

Une forme plus simple de la coulisse est celle de la figure 69 : une pièce unique porte deux trous et une rainure circulaire ; les deux trous reçoivent les axes d'articulation des barres d'excentrique, et en outre des bielles de suspension ; le coulisseau portant l'axe A glisse dans la rainure. On voit que cet axe A ne peut plus coïncider avec les articulations C et C′ des barres ; la zone utile de la coulisse est réduite.

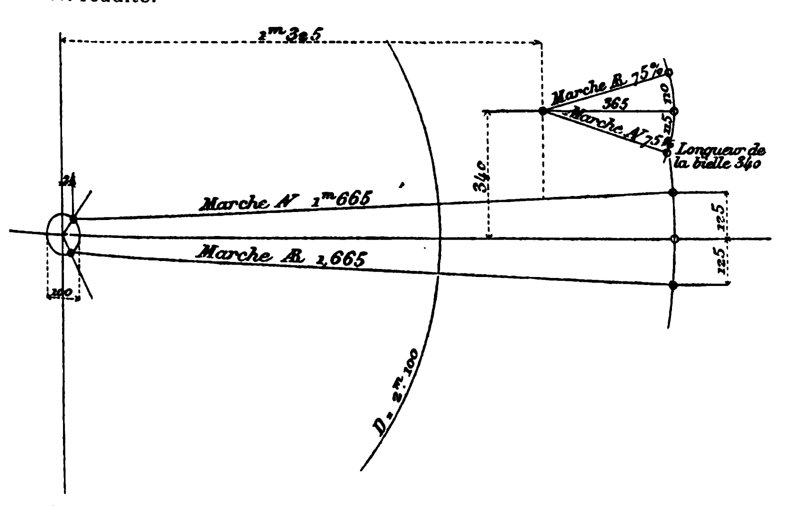


Fig. 71. — Distribution de locomotive par coulisse de Stephenson.

La figure 70 représente une forme presque aussi simple que celle de la figure 69, mais où l'amplitude de la course du coulisseau est augmentée. On ne se trouve plus exactement dans les mêmes conditions que précédemment, le coulisseau se mouvant sur un cercle qui ne passe pas par les axes d'articulation des barres. Les différences secondaires de distribution qui en résultent paraissent sur les épures exactes.

Quand un seul excentrique commande le tiroir, toutes les pièces de la distribution peuvent avoir un plan de symétrie commun, perpendiculaire à l'arbre moteur. Il n'en est plus de même quand deux excentriques mènent les extrémités d'une coulisse : ces deux excentriques sont placés de part et d'autre du plan de symétrie de la coulisse. Il en résulte une certaine obliquité d'efforts, qui augmente un peu les frottements des articulations. Quelquefois on rétablit la symétrie en divisant l'un des excentriques en deux moitiés encadrant l'autre excentrique.

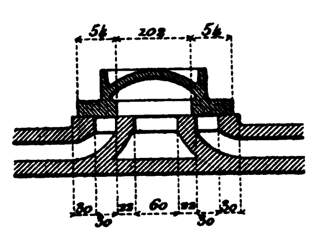


Fig. 72. — Tiroir et lumières de la distribution commandée par la coulisse de la figure 71.

Les figures 71 et 72 représentent une distribution de locomotive par coulisse de Stephenson. Le tableau qui suit en donne les phases, sur les côtés avant (AV), le plus éloigné de l'essieu et arrière (AR) du piston, pour neuf positions de l'arbre de relevage. Les phases sont définies par les parcours du piston, en centièmes de sa course.

Les différences dans la distribution d'un côté à l'autre du piston, peu importantes, sont parfois plus fortes dans d'autres applications.

49. Sytèmes divers de coulisses. — La *coulisse de Gooch*, ou *coulisse retournée* (fig. 73), est commandée, comme celle de Stephenson, par deux *barres* TC et T'C'; elle est suspendue par une bielle JE, oscillant autour d'un axe E invariable. La tige du tiroir est entraînée par une bielle AB, suspendue par la bielle GH au levier HK de l'arbre de relevage. Suivant la position donnée à cet arbre de relevage, l'extrémité A de cette bielle est commandée par l'un des bouts C, C', ou par un point intermédiaire quelconque de la coulisse. Le tiroir est ainsi conduit soit par l'un des excentriques,

SENS DE LA MARCHE	AVANCES LINÉAIRES		OUVERTURES MAXIMA DES LUMIÈRES A L'ADMISSION		ADMISSION		DÉTENTE		ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ		ÉCHAPPEMENT		COMPRESSION		ADMISSION ANTICIPÉE	
	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV
	mm	mm	mm	mm	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
Avant . . .	1	1	24	22	73	77	19	17	8	6	93	91	6 7/8	8 7/8	1/8	1/8
Arrière. . .	3	2	23	21	72	75	20	18	8	7	92	91	7 2/3	8 3/4	1/3	1/4
Avant . . .	3	2 1/2	13	12	54	57 1/2	31	30 1/2	15	12	87	84	12 1/2	15 1/3	1/2	2/3
Arrière. . .	4 1/2	3	12 1/2	12	51	55	33	31	16	14	85	82 1/2	14 1/3	17	2/3	1/2
Avant . . .	4	3	8	7	35	37	41	44	24	19	78	73	21 1/4	26	3/4	1
Arrière. . .	5	3 1/2	8	7	32 1/2	35	42 1/2	42	25	23	75	71	23 1/2	28	1 1/2	1
Avant . . .	5	4	5 1/2	4 1/2	20	20	45	50	35	30	66	61	32	36 1/2	2	2 1/2
Arrière. . .	4 1/2	3 1/2	5 1/2	4 1/2	19	21	46	48	35	31	66	61	31	36	3	3
Point mort.	5	4	5	4	11	10	41	47	48	43	54	48	40	45	6	7

OT, OT′, soit par un excentrique fictif dont le centre est sur la droite TT′.

Le rayon de la coulisse est la longueur même de la bielle AB : dans la position de la figure 73, c'est-à-dire quand la manivelle motrice est au point mort, on peut manœuvrer l'arbre de relevage sans déplacer le tiroir, qui donne à ce

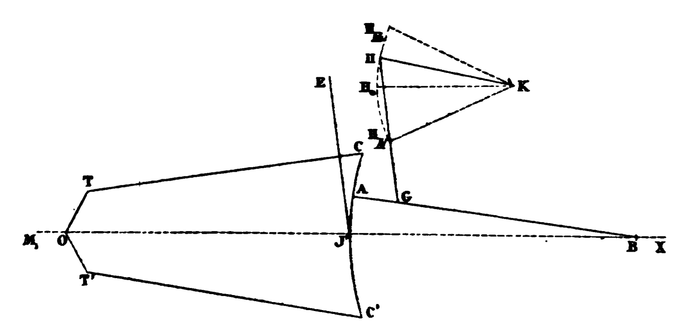


Fig. 73. — Schéma du mécanisme de distribution par coulisse de Gooch.

OT, OT′, rayons des excentriques ; — CC′, coulisse suspendue au point fixe E ; AB, bielle du tiroir, suspendue au levier HK de l'arbre de relevage K.

moment l'*avance linéaire*. Il en est de même quand la manivelle motrice est à son autre point mort. La coulisse de Gooch donne des avances linéaires constantes pour toutes les positions de l'arbre de relevage, du moins quand elle est montée régulièrement, de telle sorte que l'arc CC′ se place normalement à l'axe OX, quand la manivelle motrice passe par ses points morts.

La constance des avances linéaires n'entraîne pas celle des périodes d'admission anticipée, qui sont d'autant plus longues que le coulisseau est plus près du milieu de la coulisse : les centres des excentriques fictifs sont rangés sur la corde $T_1T'_1$ (fig. 74), et l'admission anticipée se produit pendant le parcours d'un arc de projection constante EG_1, c'est-à-dire pendant le parcours d'un angle d'autant plus grand que le rayon, qui varie de OT_1 à OG_1, est plus petit.

La *coulisse d'Allan* (fig. 75) est droite ; elle est suspendue à un levier KH de l'arbre de relevage, dont un second levier KH' porte la bielle AB du tiroir : quand on fait tourner cet arbre, on élève la coulisse et on abaisse la bielle, et *vice versa*. Les avances linéaires ne sont pas constantes, mais la variation en est moindre qu'avec la coulisse de Stephenson.

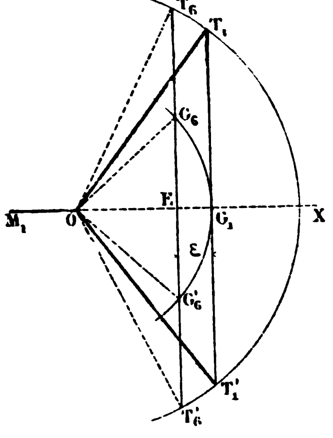


Fig. 74. — Variation de la période d'admission anticipée, avec avance linéaire constante. Le parcours angulaire pendant cette période varie de $T_6 T_1$ à $G_6 G_1$ quand le centre de l'excentrique fictif passe de T_1 à G_1.

Les mécanismes de Gooch et d'Allan demandent une longueur plus grande que celui de Stephenson, pour être montés dans des conditions analogues, puisqu'il faut loger en plus la bielle AB.

Dans l'appareil de *Walschaerts*, un seul excentrique OT_1, calé perpendiculairement

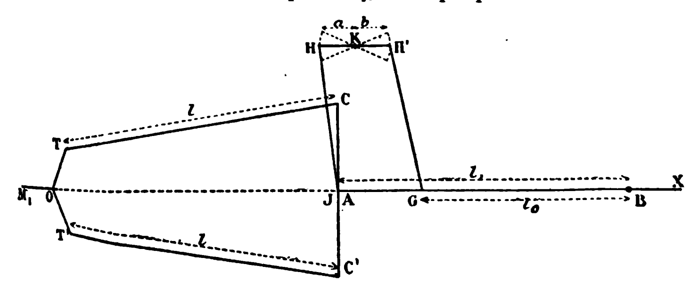


Fig. 75. — Coulisse d'Allan, schéma.

OT, OT', rayons des excentriques ; — K, arbre de relevage, auquel est suspendue la coulisse, CC', en H et la bielle du tiroir, AB, en H'.

à la manivelle motrice OM_1 (fig. 76), fait osciller la coulisse

CC′ autour d'un axe fixe I. La bielle AB, articulée en B sur le levier EF, est suspendue au levier KH de l'arbre de relevage K, de telle sorte qu'on peut déplacer l'extrémité A dans toute l'étendue de la coulisse. L'extrémité E du levier EF est rattachée à la tête du piston moteur par la biellette ME. Enfin le point F, guidé en ligne droite suivant X′Y′, conduit le tiroir.

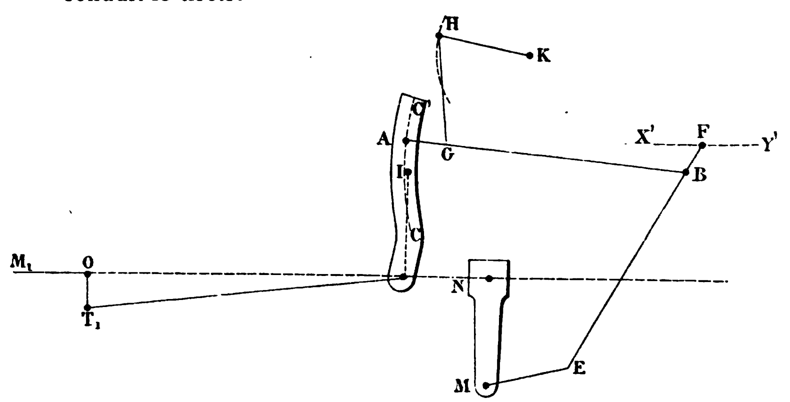


Fig. 76. — Schéma de la distribution Walschaerts.

OT_1, rayon de l'excentrique unique; — CC′, coulisse oscillant autour du point fixe I; — AB, bielle suspendue au levier HK de l'arbre de relevage K; — EBF, levier d'avance, commandé en E par la crosse de piston et entrainant par F le tiroir.

Pour déterminer les excentriques fictifs équivalents à ce mécanisme, il faut considérer le levier EF comme une coulisse droite, dont l'extrémité E est conduite par la manivelle motrice même, OM_1 (fig. 76) : quant à la coulisse CC′, qui oscille autour de l'axe I, ce n'est qu'un balancier de renvoi qui réduit plus ou moins l'amplitude du mouvement donné par l'excentrique OT_1, et qui en renverse le sens quand le point A se trouve entre I et C′. Cette coulisse CC′ équivaut donc à un excentrique perpendiculaire à OM_1 et dont le rayon varie de OT_1 à OT'_1 (fig. 77). Soit OT cet excentrique équivalent, pour une position quelconque de l'arbre de relevage ; d'après la règle générale, on divise M_1T par un

point L placé comme le point F, qui mène le tiroir, sur la coulisse droite EB. L'excentrique fictif a pour rayon OL. Tous les points L ainsi construits se rangent sur la ligne droite $L_1L'_1$,

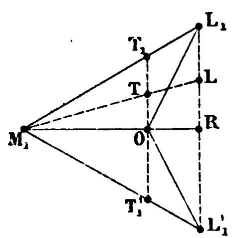


Fig. 77.— Excentriques fictifs de la distribution Walschaerts.

Les avances linéaires de la distribution Walschaerts sont constantes, aux divers crans de marche, parce que le centre de l'arc CC′ de la coulisse se trouve précisément en B, quand la manivelle motrice est à l'un de ses points morts : on peut alors manœuvrer l'arbre de relevage sans déplacer le tiroir, qui, dans cette position, donne l'avance linéaire.

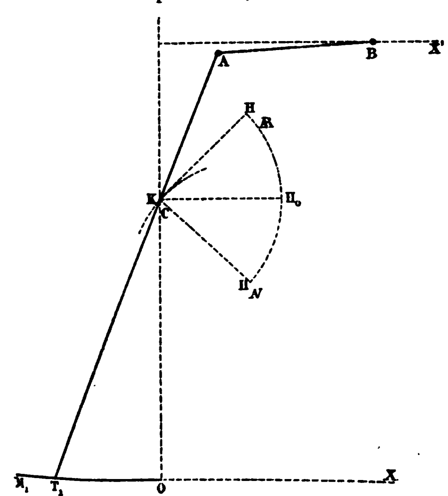


Fig. 78. — Distribution Marshall.

OT, rayon de l'excentrique ; — TCA, barre dont le point C décrit un arc de cercle autour de l'extrémité H du levier HK de l'arbre de relevage K, et dont le point A conduit le tiroir.

Le mécanisme de Walschaerts donne à peu près la même distribution sur les deux faces du piston, parce qu'elle élimine l'influence perturbatrice qui provient de la bielle motrice, en prenant un de ses mouvements de commande sur la crosse même du piston.

Dans la *distribution de Marshall*, la tige du tiroir, BX′ (fig. 78), est conduite par un point A d'une barre menée par l'excentrique OT, calé dans la direction même de la manivelle motrice OM ; le point C de cette barre est astreint à

décrire un arc de cercle autour d'un centre H, qui peut occuper diverses positions sur l'arc H_{AV} H_0 H_{AR} : le point H est l'extrémité du levier de l'arbre de relevage, dont l'axe est en K.

Pour trouver les excentriques fictifs, on prend (fig. 79). sur la perpendiculaire au rayon de l'excentrique OT, des longueurs OD, OD' égales à la demi-course la plus grande du point C projeté sur une parallèle à OX ; il suffit alors de diviser TD prolongé de telle sorte que $\frac{LT}{DT} = \frac{AT_1}{CT_1}$. Le centre de l'excentrique fictif se déplacera sur LL'.

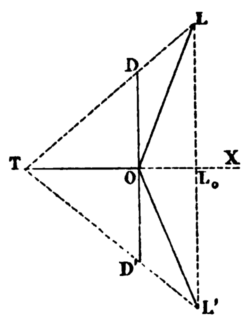


Fig. 79. — Excentriques fictifs de la distribution Marshall : les centres de ces excentriques se rangent sur la droite LL'.

La distribution de Marshall donne encore des avances linéaires constantes aux divers crans de marche, pourvu que le point C, articulé sur la bielle de suspension HC, vienne se projeter sur l'axe K de l'arbre de relevage quand la manivelle motrice passe à ses points morts. Alors la manœuvre de l'arbre ne déplace pas le tiroir.

La distribution Marshall se prête à des variantes assez nombreuses. Le point A, qui conduit le tiroir, peut être placé entre le centre de l'excentrique T, et le point K guidé par l'arbre de relevage ; l'excentrique est alors à l'opposé de la manivelle motrice (fig. 80).

Si l'admission se fait par les bords intérieurs d'un tiroir cylindrique, la poulie d'excentrique reste calée suivant la manivelle motrice quand le point A se trouve entre les deux points guidés T et C, ou, au contraire, est à l'opposé de la manivelle quand A est placé sur le prolongement de TC. En pratique, le calage de l'excentrique présente de petits écarts de direction.

La barre de la distribution Marshall n'agit pas en tirant ou en poussant le tiroir suivant sa longueur, mais est sou-

mise à des efforts transversaux. La forme est établie en

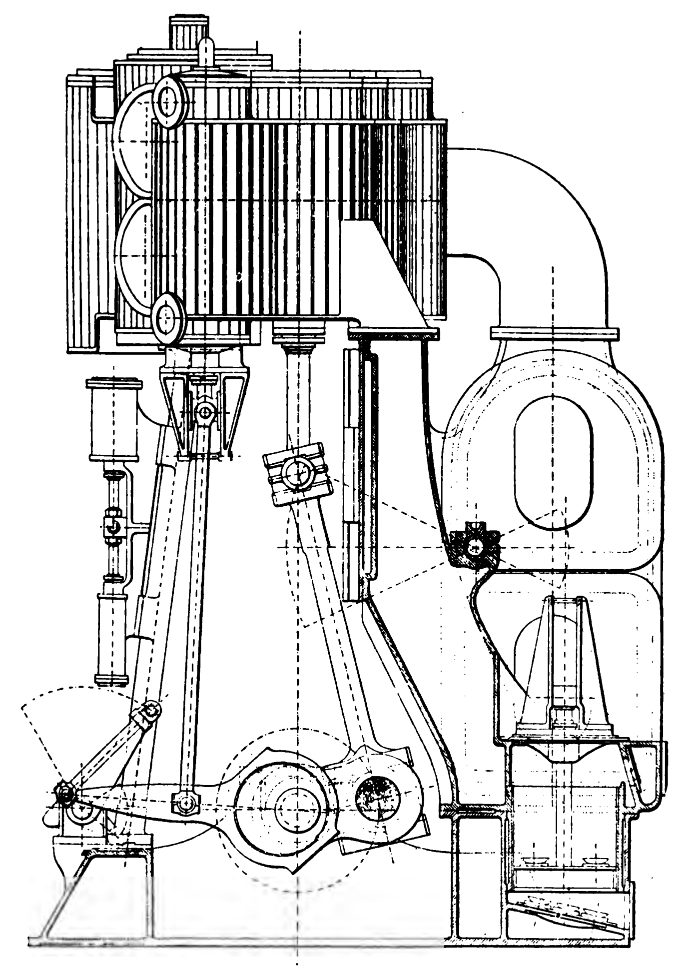


Fig. 80. — Distribution Marshall de « la Charente », construite vers 1887 par les Forges et Chantiers de la Méditerranée : excentrique calé à peu près à l'opposé de la manivelle motrice; l'extrémité de la barre (à gauche) oscille autour d'un centre qu'on déplace par la manœuvre de l'arbre de relevage.

conséquence, pour que ces efforts ne la fassent pas fléchir.

La distribution Joy (fig. 81) n'a plus d'excentrique. Un

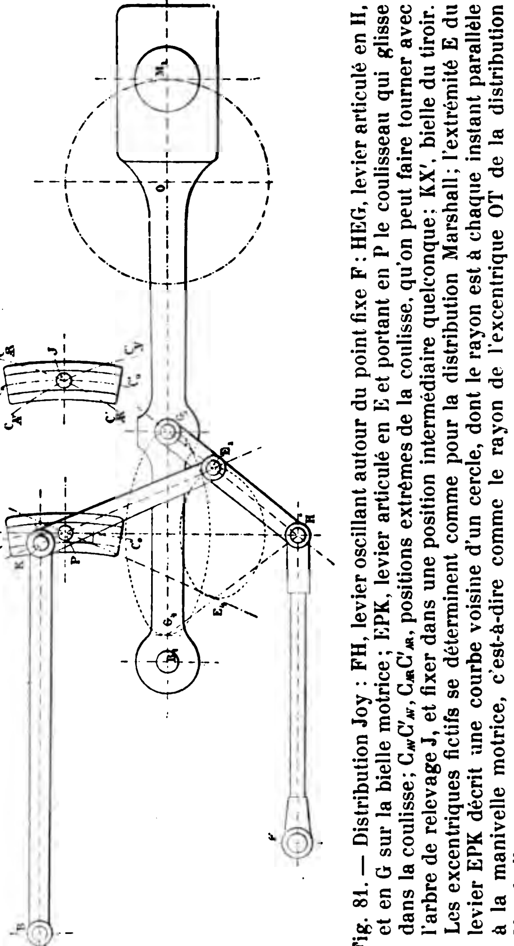


Fig. 81. — Distribution Joy : FH, levier oscillant autour du point fixe F : HEG, levier articulé en H, et en G sur la bielle motrice ; EPK, levier articulé en E et portant en P le coulisseau qui glisse dans la coulisse ; $C_{AV}C'_{AV}$, $C_{AR}C'_{AR}$, positions extrêmes de la coulisse, qu'on peut faire tourner avec l'arbre de relevage J, et fixer dans une position intermédiaire quelconque ; KX', bielle du tiroir. Les excentriques fictifs se déterminent comme pour la distribution Marshall ; l'extrémité E du levier EPK décrit une courbe voisine d'un cercle, dont le rayon est à chaque instant parallèle à la manivelle motrice, c'est-à-dire comme le rayon de l'excentrique OT de la distribution Marshall.

levier GH est articulé en un point G de la bielle motrice, point qui décrit une courbe voisine d'une ellipse, et à l'ex-

trémité H sur une tige HF oscillant autour d'un point fixe F. Le point H parcourt un arc de cercle voisin d'une droite perpendiculaire à l'axe OX du cylindre. Un second levier EPK est articulé en un point E de GH ; le point P de ce levier est astreint à se mouvoir dans une coulisse fixe CC', et le point K conduit la bielle KB du tiroir. La coulisse fixe CC' peut se déplacer à volonté et occuper toutes les positions entre C_{AV} C'_{AV}, correspondant à la marche avant, et C_{AR} C'_{AR}, correspondant à la marche arrière, en pivotant autour de son milieu J.

Le point P du levier venant se placer au milieu J de la coulisse dans la position de la figure, quand la manivelle motrice est à ses points morts, on peut alors déplacer la coulisse sans que le tiroir bouge : les avances linéaires sont constantes.

Bien d'autres appareils à coulisse pour changement de marche se rapprochent plus ou moins des types qui viennent d'être décrits. D'une manière générale, on peut dire que les divers systèmes de coulisses réalisent des distributions à peu près équivalentes : les différences les plus importantes résultent de la constance ou de la variation des avances linéaires. Ce sont surtout les facilités de l'installation sur chaque machine qui font choisir un système. Par exemple, lorsque la place est suffisante pour que les tiroirs se logent commodément à côté des cylindres, de telle sorte que l'axe du tiroir se trouve dans le plan formé par l'axe du cylindre et l'axe de l'arbre moteur, les distributions de Stephenson, de Gooch, d'Allan conviennent. Au contraire, si le tiroir doit être monté au-dessus ou au-dessous du cylindre d'une machine horizontale, ou latéralement dans une machine verticale, c'est-à-dire quand l'axe du tiroir et l'axe du cylindre sont dans un plan perpendiculaire ou oblique à l'axe de l'arbre moteur, les distributions de Walschaerts, Marshall, Joy sont, en général, plus commodes.

On demande aux coulisses deux genres de service différents : ou bien la coulisse n'est qu'un simple appareil de

changement de marche : l'arbre de relevage est toujours placé dans l'une ou l'autre de ses positions extrêmes; ou bien la coulisse sert en outre à faire varier la distribution de la vapeur et fonctionne dans ses positions intermédiaires.

50. Commande de l'arbre de relevage. — On manœuvre simplement l'arbre de relevage des petites machines à l'aide d'un levier, qu'un verrou, pénétrant dans les encoches d'un secteur denté, permet d'arrêter dans une série de positions. Souvent on préfère une vis que fait tourner un volant de manœuvre; cette vis déplace un écrou qui pousse ou qui tire une tringle articulée à l'extrémité d'un levier calé sur l'arbre de relevage. C'est une disposition fréquemment adoptée pour les locomotives.

Quand l'effort à produire dépasse une certaine valeur, la manœuvre à bras devient difficile ou impossible. Une machine auxiliaire commande alors les mécanismes de relevage. Un piston, pressé par la vapeur dans l'un ou l'autre sens, convient pour la manœuvre de la tringle, qui fait tourner l'arbre de relevage; pour régler l'action de ce piston, on conserve la vis manœuvrée à la main, dans l'appareil *à contre-poids de vapeur* (fig. 82) : le pas de la vis est assez faible pour qu'elle ne soit pas *réversible*, de telle sorte qu'il est nécessaire de la faire tourner à la main pour que le piston se déplace.

On conjugue aussi le piston moteur de l'arbre de relevage avec un *frein à huile*, formé d'un piston qui se meut dans un cylindre rempli d'huile, dont les deux côtés peuvent communiquer par un tuyau muni d'un robinet. Tant que ce robinet est fermé, le mouvement est impossible : avec une faible ouverture du robinet, le mouvement est lent et on reste facilement maître de l'appareil.

On fait aussi usage d'une forme simple de *servo-moteur*, disposé pour que le piston poussé par la vapeur reproduise exactement le déplacement donné par la main à un levier de manœuvre. La vapeur est distribuée dans le cylindre par

un tiroir sans recouvrements. En déplaçant le levier de manœuvre à partir de sa position moyenne, on admet la vapeur dans le cylindre : le piston se met en marche, mais

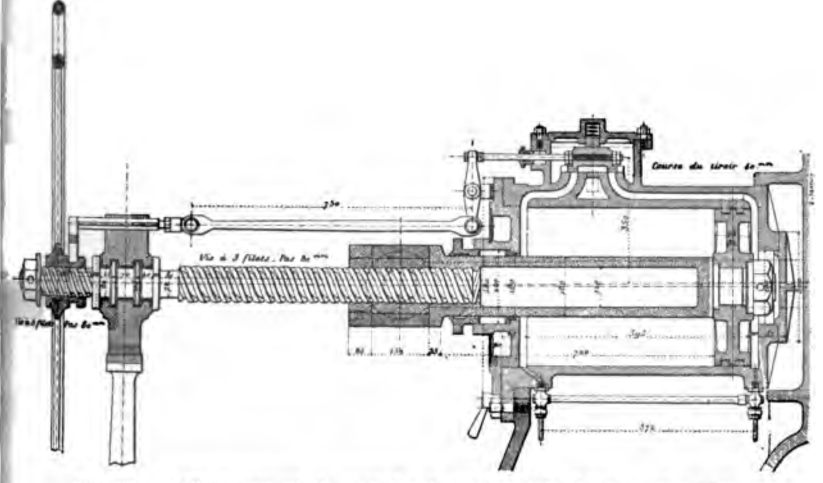


Fig. 82. — Changement de marche à contrepoids de vapeur, pour machine marine, construite en 1879 ; un petit déplacement préliminaire du volant de manœuvre ouvre l'admission sur une des faces du piston, qui déplace l'arbre de relevage quand on fait tourner la vis.

alors il ramène le tiroir vers sa position moyenne, qu'il atteint quand la course du piston correspond à celle du levier de manœuvre. L'appareil s'arrête alors.

51. Mécanismes divers de changement de marche. — Les distributions, obtenues à l'aide des mécanismes de changement de marche, se rapprochent de celles que donnerait un *excentrique fictif*, de calage et de rayon variables. En réalisant cet excentrique fictif, on obtient les mêmes effets.

Le centre de l'*excentrique sphérique Tripier* peut se déplacer suivant TT' (fig. 83), parce que la poulie est articulée en K sur un axe porté par l'arbre moteur. Dans ce déplacement, le centre parcourt, au lieu d'une ligne droite, un arc de

cercle, TT′; ce qui a obligé à donner la forme sphérique à l'extérieur de la poulie et au collier d'excentrique.

L'excentrique mobile porte une seconde articulation, en D, avec une biellette, qui le rattache à un manchon S pouvant glisser le long de l'arbre. Il est facile de déplacer ce manchon et de l'arrêter dans une position quelconque; sa surface extérieure présente deux joues, entre lesquelles est monté un second manchon S′ qui l'entoure. Ce second manchon, fileté sur sa face extérieure, ne participe pas à la rotation de l'arbre de la machine, et on peut lui imprimer à volonté un déplacement longitudinal en le faisant tourner dans un écrou fixe E, à l'aide du volant V.

La *transmission hydraulique* des pressions donne un moyen simple en prin-

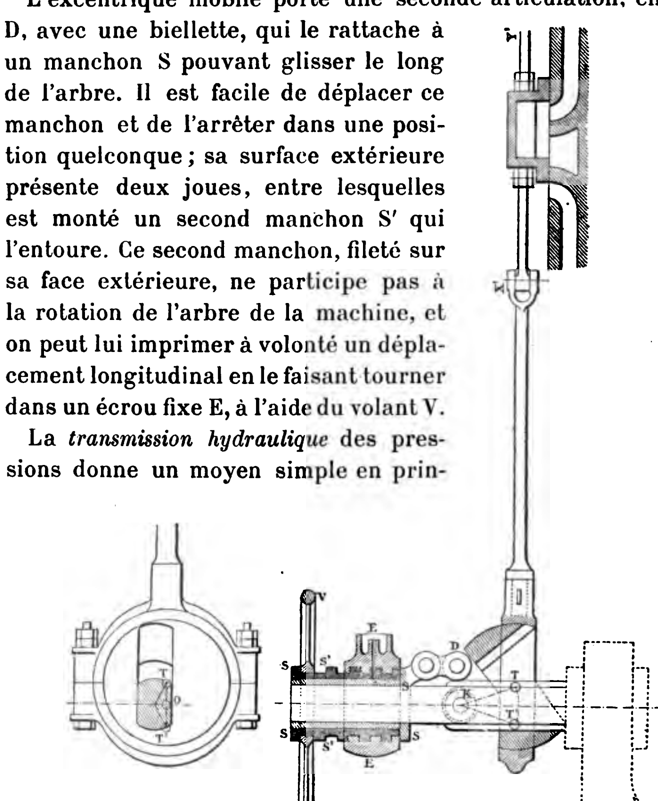


Fig. 83. — Excentrique sphérique Tripier.

cipe de réaliser les excentriques fictifs d'une coulisse : la poulie d'excentrique est fixée sur un piston, qui joue dans un cylindre fixé à l'arbre moteur (ou, inversement, c'est le cylindre qui se déplace sur le piston); la course est égale et parallèle à la droite (TT′) que doit parcourir le centre

de la poulie. L'appareil de manœuvre consiste en un cylindre pareil avec piston ; deux conduits réunissent deux à deux les extrémités des cylindres. Tout l'appareil étant plein d'eau, de glycérine ou d'huile, un piston entraine l'autre. Pour qu'il ne se produise pas de jeu dans la transmission, il faut que le fluide remplisse toujours complètement les cylindres et les conduits. Si le principe est simple, il est assez difficile d'établir la double communication étanche entre le cylindre mobile, qui tourne avec l'arbre de la machine, et le cylindre fixe. M. Muller a employé à cet effet, il y a une vingtaine d'années, des tuyaux de cuivre flexibles, qui viennent se fixer sur la bielle du tiroir. La disposition de *Joy* consiste à forer des conduits dans l'arbre et dans ses coudes, avec raccords au bout de l'arbre et dans un des paliers.

On voyait à l'exposition de 1900 une machine à plusieurs cylindres, étudiée par M. Bonjour, où la transmission hydraulique était appliquée directement à la commande des tiroirs, chaque tiroir étant actionné par un piston poussé par un liquide refoulé par un autre piston. Le piston commandé répétait les mouvements du piston moteur.

52. Distributions à deux tiroirs. — Avec un tiroir conduit par un excentrique, ou par une coulisse, qui donne à peu près la même distribution que des excentriques fictifs, on ne peut obtenir une courte période d'admission qu'en augmentant beaucoup les périodes d'échappement anticipé et de compression. Les distributions à deux tiroirs combinent une grande détente et une compression modérée ; elles sont généralement disposées pour que cette détente soit variable à volonté.

Un procédé, simple en principe, consiste à séparer les organes d'admission et d'échappement, en montant, sur des côtés opposés du cylindre, deux tiroirs différents, conduits chacun par un excentrique. Ces tiroirs sont réduits à des plaques masquant ou démasquant les lumières : comme il

convient que la pression les applique toujours sur leurs tables, le tiroir d'échappement doit jouer dans une cavité communiquant avec l'intérieur du cylindre.

Dans le système de *Gonzenbach*, un tiroir de distribution ordinaire (fig. 84), réglé pour une grande admission et pour une compression modérée, se meut dans une boîte à vapeur aussi petite que possible. La vapeur pénètre dans cette boîte par un orifice, que peut fermer, à un moment convenable, la *plaque*, la *glissière*, le *taquet*, la *tuile* ou le *tiroir de détente*, pièce conduite par un excentrique spécial. La détente commence au moment où cette fermeture se produit, mais l'espace libre, comprenant la boîte à vapeur du tiroir principal, est à ce moment agrandi.

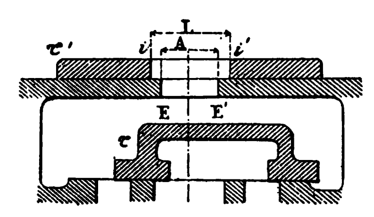


Fig. 84. — Coupe schématique de la distribution Gonzenbach : 𝔗, tiroir principal ; 𝔗', tiroir de détente venant fermer l'entrée de vapeur, EE', dans la boîte du tiroir principal.

Pour que l'appareil fonctionne convenablement, l'ouverture de la boîte à vapeur doit être déjà démasquée quand le tiroir principal découvre la lumière d'admission; une fois cette ouverture refermée, elle ne doit plus se rouvrir avant que ce tiroir n'ait recouvert la lumière d'admission qu'il couvrait; enfin la section de passage, offerte à la vapeur par l'ouverture de la boîte, doit être, autant que possible, supérieure à la section d'entrée dans la lumière donnée par le tiroir principal, pendant la plus grande partie de l'admission.

On voit sur la coupe schématique de la glissière (fig. 84) que l'admission est interrompue par le contact des bords *i* et E' et *i'* et E, et que, pour passer d'une de ces positions à l'autre, la glissière doit se déplacer d'une longueur L + A.

Pour une étude approximative de la distribution, on projette, sur l'axe $M_1M'_1$, le centre de l'excentrique qui conduit

la glissière. Quand cette projection passe sur les points E ou E' (fig. 85), l'orifice de la boîte à vapeur s'ouvre ou se ferme.

Si le rayon de l'excentrique est en OT'_1 quand la manivelle motrice passe par son point mort OM_1, la détente commence au moment où ce rayon passe en OT'_2.

Pour faire varier la détente, on modifie la course de la glissière, à l'aide d'un balancier de renvoi dont un des bras est variable ; c'est comme si on changeait le rayon OT'. Avec une course moindre, l'admission a lieu pendant une rotation plus longue. Comme la vapeur pénètre de nouveau dans la boîte quand le rayon passe par la position symétrique (par rapport à $M_1M'_1$) de celle qui interrompt l'admission, il faut qu'à ce moment la manivelle motrice ait dépassé la position OM_2, pour laquelle le tiroir principal ferme la lumière du cylindre; cette condition impose une limite inférieure à la course de la glissière.

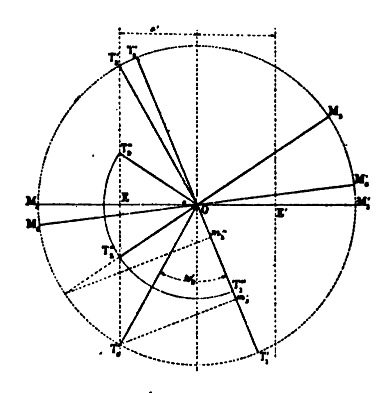


Fig. 85. — Épure approchée de la distribution Gonzenbach. OT'_1 étant le rayon de l'excentrique qui conduit la glissière, l'admission est interrompue quand ce rayon vient en OT'_2. S'il est réduit à la longueur OT''_1, le parcours angulaire pendant l'admission devient $T''_1OT''_2$. OM_2 est la position de la manivelle motrice quand le tiroir principal ferme la lumière d'admission, OM_0 sa position au début de l'admission anticipée.

On peut aussi disposer le taquet de détente pour qu'il ferme, dans sa position moyenne, l'ouverture de la boite à vapeur; il détermine l'admission par le déplacement de ses bords extérieurs. Le taquet de détente a souvent la forme d'une *grille*, formée d'une série de barrettes jouant sur des lumières multiples ; on obtient ainsi une bonne section de passage sans exagération de la course.

On réduit presque à rien l'espace libre supplémentaire dans la détente que donne la glissière Gonzenbach, en sup-

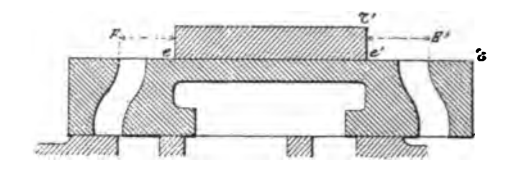


Fig. 86. — Montage de la glissière sur le dos du tiroir.

primant la cloison sur laquelle se meut la glissière et en la posant directement sur le tiroir principal; ce tiroir est muni de deux lumières spéciales, ajoutées au delà de ses *bords extérieurs* (fig. 86) et la face supérieure en est dressée. L'admission est interrompue quand la glissière vient fermer la lumière spéciale du tiroir.

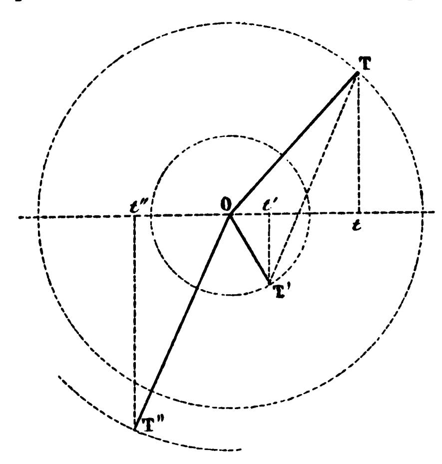


Fig. 87. — Composition des excentriques : le mouvement du point t', commandé par l'excentrique OT', par rapport à t, commandé par OT, est le même que le mouvement absolu de t'' par rapport au centre fixe O; O'T'' étant égal et parallèle à TT'.

L'étude de la distribution exige la détermination du mouvement *relatif* des deux tiroirs. On détermine approximativement ce mouvement avec une grande facilité, quand on peut négliger l'obliquité des bielles des tiroirs. OT et OT' (fig. 87) étant les rayons des deux excentriques, dans une position quelconque, un point de l'un des tiroirs se meut

comme la projection t de T et un point de l'autre comme la projection t' de T'; en construisant OT'' égal et parallèle à TT' et en prenant la projection t'' de T'', les distances Ot'' et tt' sont égales. Le mouvement relatif de t' par rapport à t est donc le même que le mouvement absolu du point t''.

L'étude est alors aussi simple que celle de la détente Gonzenbach : si l'excentrique OT'' convenait avec une glissière sur une plaque fixe, c'est en réalité l'excentrique OT', diagonale du parallélogramme construit sur OT et OT'', qui donne la même distribution, quand la glissière se meut sur le dos du tiroir.

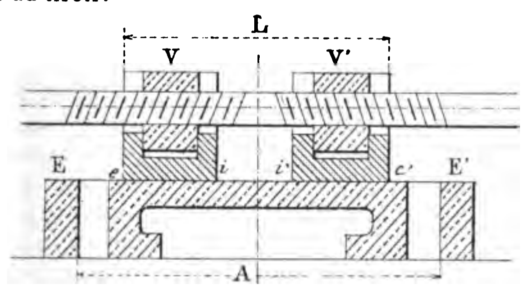


Fig. 88. — Détente Meyer : la rotation de la tige de commande, qui porte deux vis à filets opposés, éloigne ou rapproche les deux parties *ei* et *e'i'*.

En faisant conduire la glissière par une coulisse ou par un mécanisme équivalent, on obtient de grandes variations dans la période d'admission.

Dans la *détente Meyer*, fréquemment employée, le rayon et l'angle de calage de l'excentrique qui conduit la plaque de détente ne changent pas ; mais c'est la distance des bords de cette plaque qu'on peut faire varier. Elle se compose de deux parties *ei*, *e'i'* (fig. 88) qui sont entraînées par deux écrous V, V', taraudés en sens contraires, et vissés sur la tige de commande. La rotation de cette tige éloigne ou rapproche les deux écrous et modifie la longueur *ee'*. Cette rotation peut se faire pendant la marche : d'une part, la

tige est reliée au mécanisme, qui lui donne le mouvement de va-et-vient, par un joint qui en permet la rotation, et, d'autre part, elle glisse dans un manchon carré fixe, qu'on peut faire tourner à volonté. Chacun des taquets doit être assez long pour que jamais les bords *i* et *i'*, qui ne jouent aucun rôle dans la distribution, ne découvrent les lumières du tiroir principal.

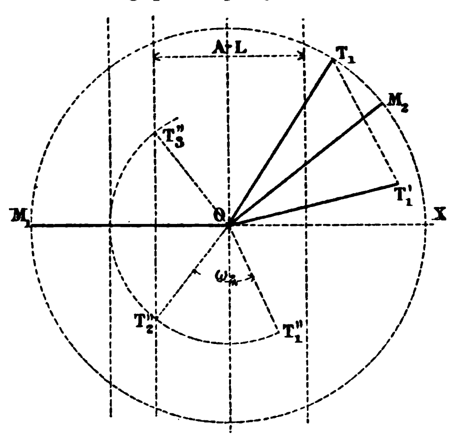


Fig. 89. — Épure approchée de la distribution Meyer : l'admission a lieu pendant le parcours angulaire variable $T''_1T''_2$.

Soit OT''_1 (fig. 89) l'excentrique fictif qui représente le mouvement relatif de la plaque de détente sur le tiroir. On mène deux perpendiculaires à l'axe OX, distantes de la longueur EE' — *ee'* ou A — L. L'admission cesse quand l'excentrique fictif passe en OT''_2, c'est-à-dire après une rotation, depuis le point mort, égale à $T''_1OT''_2$. Cet angle augmente quand la distance EE' — *ee'* augmente, c'est-à-dire quand on rapproche les deux taquets. Le taquet découvre la lumière du tiroir quand OT'' passe en OT''_3 : il faut qu'à ce moment le tiroir principal ait interrompu l'admission. Quand la direction de OT''_2 se rapproche de OM_1, la fermeture de la lumière devient lente, et le *laminage* augmente.

Souvent on cale exactement à l'opposé de la manivelle motrice l'excentrique des plaques de détente Meyer, qui peuvent alors s'appliquer sur le tiroir des machines à changement de marche.

Au lieu de composer la plaque de détente de deux parties dont on modifie l'écartement, on obtient le même effet avec

une plaque unique de forme trapézoïdale (fig. 90), qu'on déplace suivant une perpendiculaire ZZ' à l'axe du mouvement X'Y' : ce déplacement transversal modifie la cote A — L qui contrôle la période d'admission. Les bords des lumières, ouvertes sur le dos du tiroir, sont parallèles à ceux de la plaque.

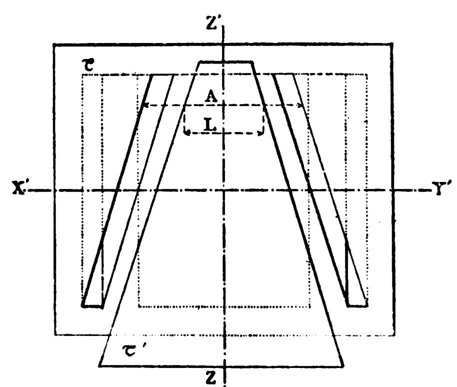


Fig. 90. — Glissière à bords obliques, avec manœuvre transversale, suivant ZZ'.

Par l'enroulement sur un cylindre de révolution, autour de l'axe X'Y' du mouvement de va-et-vient, des deux surfaces du tiroir et de la plaque qui frottent l'une contre l'autre (fig. 91), les bords obliques deviennent des hélices ; et l'effet du déplacement transversal s'obtient par une rotation de la plaque, devenue cylindrique, autour de son axe. Telle est la disposition de Rider, d'une manœuvre commode, car un faible déplacement angulaire du taquet cylindrique produit les variations de détente, qui exigent plusieurs tours de la vis à filets opposés de Meyer.

La disposition Rider est aussi réalisée à l'aide de deux tiroirs cylindriques montés concentriquement l'un dans l'autre.

Au lieu de commander directement par un excentrique les taquets, qui viennent interrompre l'admission donnée par le tiroir principal, on peut les déplacer sur le tiroir à l'aide de butées, dont on change la position quand le degré d'admission doit varier. C'est ainsi que, dans l'ancienne distribution Farcot, les taquets sont entraînés par le tiroir principal, jusqu'à ce que la butée les arrête : l'admission ne peut être ainsi interrompue que si le tiroir n'est pas

arrivé à fond de course, c'est-à-dire pour une rotation, à partir du point mort, inférieure au complément de l'angle d'avance, δ. Des butées fixes font découvrir de nouveau les lumières d'admission du tiroir.

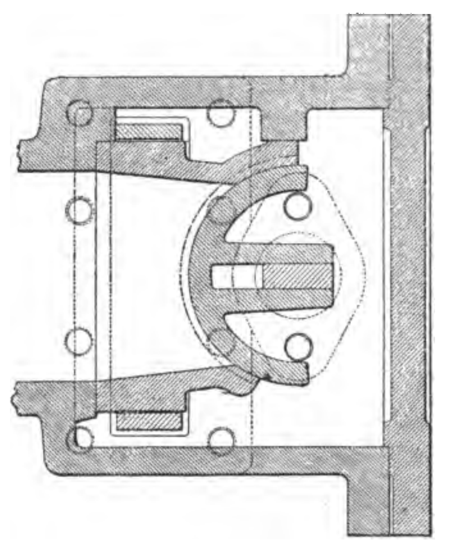


Fig. 91. — Détente Rider, coupe transversale; la surface extérieure du tiroir principal est cylindrique et porte deux lumières à bords en hélice, sur lesquelles se meut le tiroir de détente.

Farcot a augmenté la période d'admission, en plaçant les taquets sur un tiroir spécial, superposé au tiroir principal, et commandé par un excentrique calé à 60° environ en avant de la manivelle motrice; ce tiroir ne sert qu'à étendre la période pendant laquelle les taquets peuvent se fermer; il porte des canaux constamment en communication avec les deux conduits d'admission du tiroir principal.

D'autres systèmes, notamment ceux de Hertay et d'Is. Claeys [1], présentent des dispositions analogues en principe.

53. Distributions Corliss. — Le nom de l'Américain George H. Corliss est attaché à une catégorie de machines caractérisées par des dispositions ingénieuses, ayant trait surtout à la distribution de la vapeur. Nombreux sont les types de

[1] Voir *La machine à vapeur*, par A. Sauvage, t. I, p. 328, et, pour plus de détails, *Annales de l'association des ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand*, t. XV, 4e livraison.

ces machines dus à Corliss lui-même, toujours à la recherche de nouveaux arrangements, et à d'autres constructeurs d'Amérique ou d'Europe.

Le succès des dispositions qu'il a imaginées montre comment on peut arriver à la réalisation des idées justes, en fait de construction de machines, pourvu qu'on sache résoudre les difficultés pratiques de l'exécution. Mais, si l'on accepte la complication des machines Corliss, c'est qu'il en résulte des avantages importants.

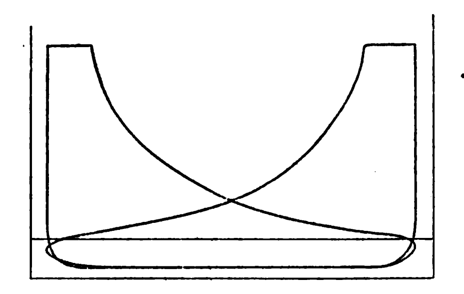


Fig. 92. — Diagrammes d'indicateur relevés sur une machine Corliss.

Dans ces machines, les espaces libres sont petits; l'admission se fait sans laminage; les périodes d'échappement anticipé et de compression sont courtes. Le diagramme d'indicateur se rapproche des tracés théoriques (fig. 92). On obtient ainsi le plus grand travail que puisse produire, avec un degré de détente déterminé, un cylindre de volume donné.

Le faible volume des espaces libres tient à deux causes : le diamètre du cylindre est petit, relativement à la course, ce qui réduit le vide dû au jeu indispensable laissé par le piston à fond de course; et les lumières sont courtes. En même temps, la surface des parois se trouve diminuée et ne dépasse guère celle de l'enveloppe cylindrique, avec deux bases planes.

La vapeur est distribuée par quatre obturateurs ou dis-

tributeurs, un pour l'admission et un pour l'échappement à chaque bout du cylindre (fig. 93); dans les machines horizontales, les distributeurs d'échappement sont placés à la partie inférieure, pour assurer l'écoulement de l'eau condensée.

Chaque obturateur est un véritable tiroir oscillant, porté par une table cylindrique, sur laquelle s'ouvre une lumière. Les axes d'oscillation des obturateurs sont perpendiculaires à l'axe du cylindre. Un tourillon, sur chacun de ces axes, sort de la boîte à vapeur, de manière à recevoir le mouvement de commande. La pression de la vapeur, aidée par de petits ressorts, applique sur sa table le distributeur, qui ne fait pas corps avec l'axe d'oscillation, mais peut s'en éloigner légèrement. Pour que l'obturateur d'échappement soit ainsi pressé contre sa table, il est monté à l'*intérieur* du cylindre, dans l'espace libre.

Souvent les obturateurs sont commandés par un plateau monté au milieu de la longueur du cylindre (fig. 94); un excentrique calé sur l'arbre de la machine fait osciller ce plateau. Malgré la complication des renvois, on voit facilement que l'excentrique commande les obturateurs à peu près comme un tiroir unique; pour deux écarts symétriques du rayon d'excentrique, par rapport à l'axe du mouvement de la petite tête de la barre d'excentrique[1], on retrouve les obturateurs dans les mêmes positions; les phases de la distribution commencent et prennent fin quand le bord actif de chaque obturateur vient en contact avec le bord de la lumière; enfin on peut compter, suivant la section circulaire des tables cylindriques, des longueurs équivalentes aux recouvrements extérieurs (pour les distributeurs d'ad-

[1] Cette petite tête est habituellement articulée à l'extrémité d'un levier calé sur un arbre oscillant, de sorte qu'elle décrit un arc de cercle au lieu d'une ligne droite : les positions correspondantes du rayon d'excentrique pour lesquelles la petite tête se retrouve à la même place ne sont pas rigoureusement symétriques par rapport à l'axe considéré, mais cela ne modifie pas sensiblement la loi du mouvement.

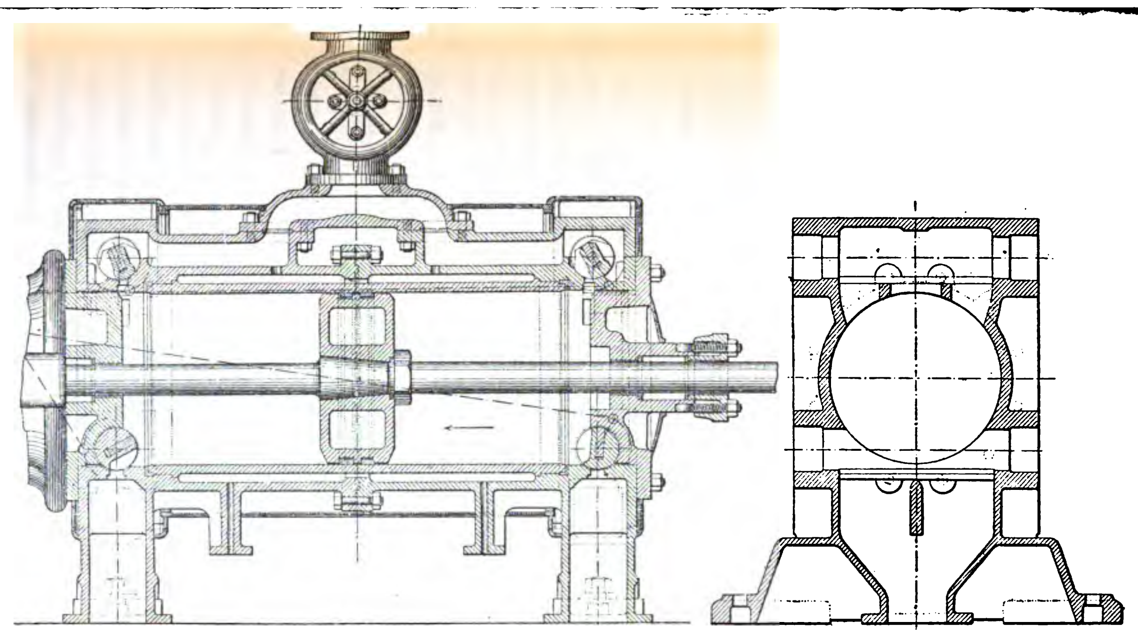


Fig. 93. — Cylindre de machine Corliss, construite en 1889 par E. Garnier; coupe longitudinale, et coupe transversale par les axes de deux distributeurs; distributeurs d'admission à la partie supérieure, et d'échappement à la partie inférieure.

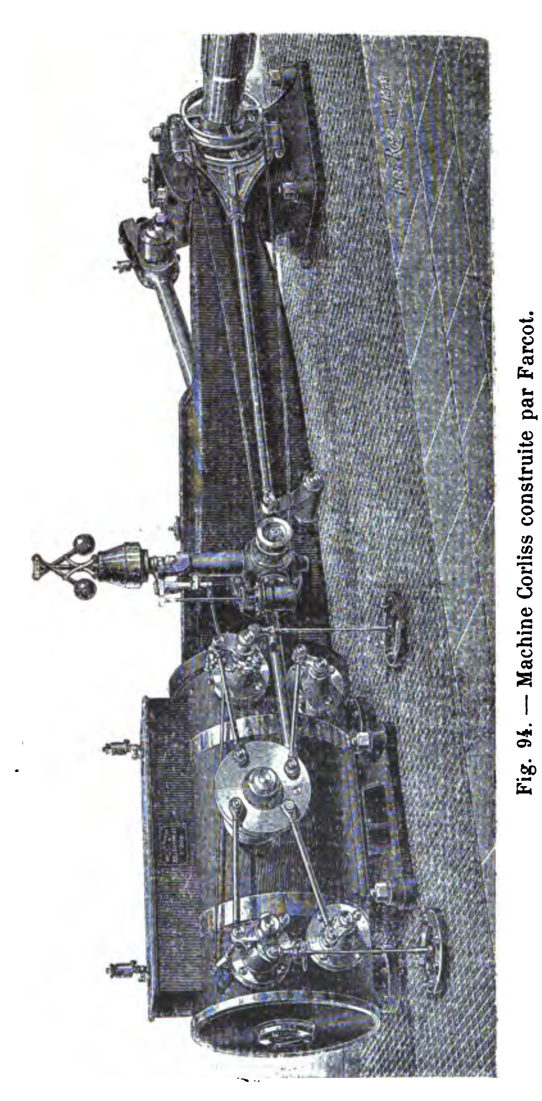


Fig. 94. — Machine Corliss construite par Farcot.

mission) et intérieurs (pour les distributeurs d'échappement). L'excentrique est calé à 180° de sa position normale, quand le plateau agit comme un balancier de renvoi.

L'angle d'avance de l'excentrique est habituellement petit : aussi la période d'admission se prolongerait pendant presque toute la course du piston, et les périodes d'échappement anticipé et de compression sont très courtes ; pour obtenir la détente, on ajoute aux distributeurs d'admission des mécanismes de rappel et des déclics, qui en provoquent la fermeture brusque, quand le piston a parcouru une fraction de sa course : on réalise ainsi une courte période d'admission, suivie d'une longue détente. Pour cette fermeture brusque, l'obturateur se

sépare du mécanisme de commande qui l'entraînait : il est repris par ce mécanisme pendant le retour du piston, afin de fonctionner de même pendant la course suivante.

C'est un ressort, ou un système équivalent, qui ferme le distributeur quand la rencontre d'une butée le déclenche. Un tampon pneumatique ou *dash-pot* arrête l'appareil, une fois la lumière fermée.

La butée n'est pas invariablement fixe, mais elle est en relation avec un régulateur, qui la déplace de manière à modifier la période d'admission, et, par suite, le travail donné par coup de piston.

Corliss et ses imitateurs ont beaucoup varié les mécanismes qui produisent ces effets. On ne trouvera dans le présent paragraphe que quelques exemples de ces dispositions nombreuses. Pour apprécier ces mécanismes, on examinera quelle est la plus grande valeur qu'ils peuvent donner à l'admission. Souvent le déclenchement du déclic n'est possible que pendant le parcours de l'angle T_1OX' (fig. 95) par le rayon de l'excentrique : les pièces commandées par l'excentrique prennent en effet leurs plus grands écarts quand le rayon OT atteint la direction OX', puis rebroussent chemin quand ce rayon dépasse OX'. Si la butée est trop éloignée pour que la pièce, qu'elle doit déclencher, l'atteigne pendant ce parcours angulaire T_1OX', elle n'est plus rencontrée pendant le reste de la course : l'admission peut varier depuis une faible valeur jusqu'à un maximum, qui correspond à une rotation un peu inférieure à T_1OX' ; elle a lieu au plus pendant les 30 ou 35 centièmes environ de la course du piston, et encore grâce à la petitesse de l'angle d'avance δ. Au delà, on n'obtient plus qu'une admission prolongée pendant presque toute la course, qui ne peut convenir pour la marche régulière de la machine. Souvent, cette admission de 30 à 35 p. 100 au maximum suffit amplement. D'autres fois, surtout pour les machines compound, cette limite est trop basse : aussi a-t-on imaginé des mécanismes de déclen-

chement qui fonctionnent aussi bien pendant le retour des pièces à déclencher que pendant l'aller, de sorte que l'admission peut durer pendant une fraction quelconque de la course du piston.

Le déclenchement, pour l'un et l'autre sens du mouvement de la barre d'excentrique, s'obtient de deux manières

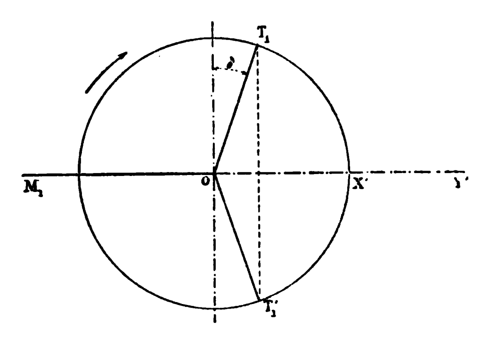


Fig. 95. — Calage de l'excentrique et périodes de déclenchement des machines Corliss; les mécanismes commandés par le centre de l'excentrique T se retrouvent dans les mêmes positions quand ce centre occupe deux positions symétriques telles que T_1 et T'_1; avec les mécanismes ordinaires, le déclenchement ne peut se produire que pendant le parcours T_1X'.

différentes : tantôt on munit l'obturateur d'admission de deux déclics, pouvant fonctionner l'un pendant l'aller, l'autre pendant le retour ; la touche du second déclic doit être articulée de manière à s'effacer, pendant l'aller, sous la butée qu'elle rencontrera en rebroussant chemin, si le premier déclic n'a pas agi; tantôt on dispose des mécanismes tels que la rencontre de la pièce à déclencher et de la butée puisse se produire quand le piston est en un point quelconque de sa course; par exemple en faisant décrire une courbe ovale à la pièce à déclencher, au lieu de la faire revenir sur sa trajectoire d'aller.

Le premier système, celui de la double butée, n'est pas complètement satisfaisant en principe, car, si la période

d'admission donnée par la simple butée est trop courte, c'est en général une admission un peu plus longue seulement qu'il faudrait; c'est donc quand le rayon d'excentrique est voisin de son point mort, en OX′ (fig. 95), que le déclenchement devrait se produire. Or, dans le voisinage de cette position, ni l'une ni l'autre butée ne fonctionne avec précision.

Les mécanismes à longue admission ont un avantage incident : on n'est plus obligé, pour obtenir une admission suffisante, de donner à l'excentrique un très petit angle d'avance, et on peut fixer cet angle de manière à réaliser, à l'aide des distributeurs d'échappement, une certaine compression. Cette compression peut être utile pour éviter l'application trop brusque de la pleine pression de la vapeur sur le piston.

Un autre moyen pour obtenir une compression un peu grande consiste à employer un second excentrique, qui actionne les distributeurs d'échappement, et auquel on donne le calage convenable.

On dispose les bielles de renvoi qui commandent les distributeurs de manière à en produire rapidement l'ouverture et la fermeture, puis à les déplacer le moins possible pendant que les lumières sont découvertes ou closes. La loi de la fermeture par l'excentrique n'est d'ailleurs intéressante que pour les distributeurs d'échappement, puisque ceux d'admission sont refermés brusquement par des mécanismes spéciaux.

Pour cette fermeture brusque, on emploie des ressorts en acier ou pneumatiques. Le ressort pneumatique est un piston chargé par l'atmosphère; on le combine avec le *dash-pot* (fig. 96), qui sert de tampon d'arrêt : le réglage et l'entretien sont un peu plus difficiles qu'avec le ressort à lames ou à boudin. Quelquefois la pression de la vapeur est substituée à celle de l'atmosphère.

Cet amortissement de la vitesse ne présente, en principe, aucune difficulté, puisqu'une fois la fermeture rapide pro-

duite, on dispose d'un excès de course aussi grand qu'il est utile pour l'arrêt graduel de l'obturateur.

Il est clair que la fermeture n'est jamais *instantanée*, mais demande un certain temps, pendant lequel la vapeur se lamine. Cette durée peut être réduite à un centième de seconde, de sorte que le laminage est faible dans les machines à rotation lente. Même avec la vitesse très modérée de 60 tours par minute, une course simple du piston demande 50 centièmes de seconde ; pendant la durée de la fermeture le piston parcourrait le cinquantième de sa course, s'il était animé à ce moment de sa vitesse moyenne.

Dans le type à *ressorts en lame de sabre* (fig. 97), le plateau oscillant, que conduit l'excentrique, n'est plus au milieu du cylindre; il est rapproché de l'arbre de la machine ; les distributeurs

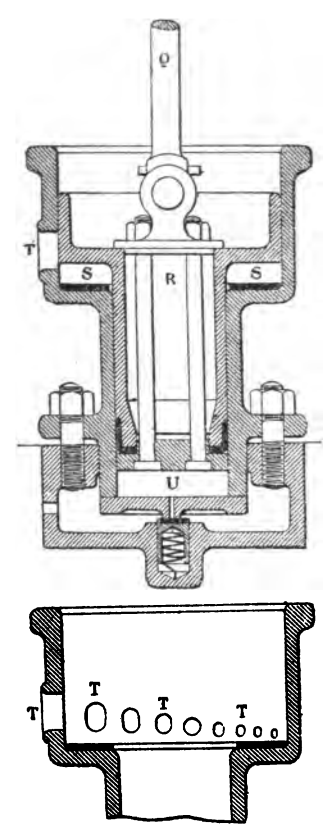


Fig. 96. — Dash-pot de machine Corliss, formant ressort pneumatique (construction du Creusot) : quand les pistons sont soulevés par la tige Q, le vide se fait dans le cylindre U. Lorsque le déclenchement se produit, la pression atmosphérique fait descendre les pistons : le grand cylindre S amortit progressivement la vitesse, l'air devant s'échapper par les trous T de plus en plus petits. Une bande de cuir arrête enfin le système ralenti. La petite soupape placée à la base du cylindre U sert à l'échappement de l'air qui pourrait y pénétrer accidentellement.

d'admission sont commandés par deux tringles que tirent deux lames de ressort, quand une butée vient soulever le taquet qui les pousse. La machine représentée figure 97 est munie d'un double mouvement de déclenchement, fonc-

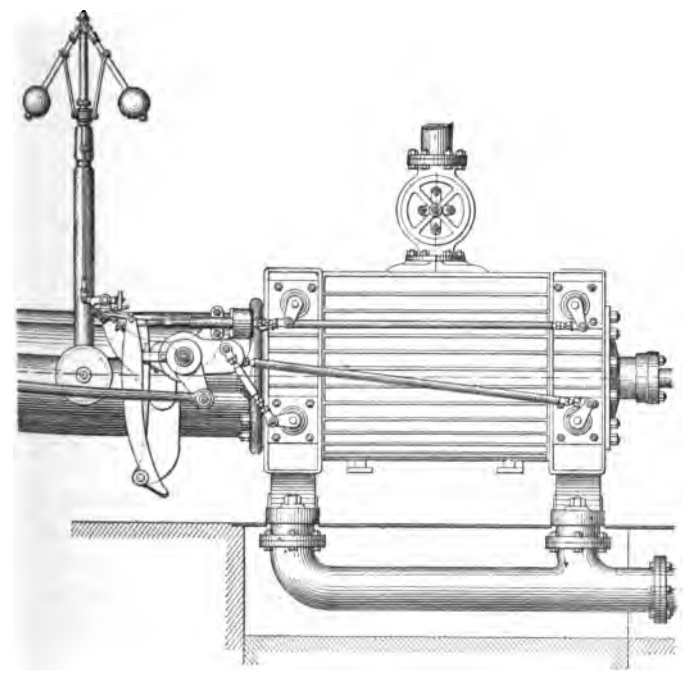


Fig. 97. — Machine Corliss à ressorts *en lame de sabre*, construite par E. Garnier.

tionnant pendant l'aller et le retour de la barre d'excentrique.

Dans le système Harris Corliss (fig. 98), la fourchette J, articulée en *m* sur la tige E de commande de l'obturateur, s'abaisse quand elle rencontre l'ergot R; le talon O laisse alors échapper le levier L, et la tige P, sollicitée par un ressort dans le sens de la flèche, ferme l'obturateur. La

tige NM, commandée par le régulateur, peut modifier la position de l'ergot R. Le ressort S relève la fourchette et assure la reprise du talon O à la fin de la course de retour de la tige E.

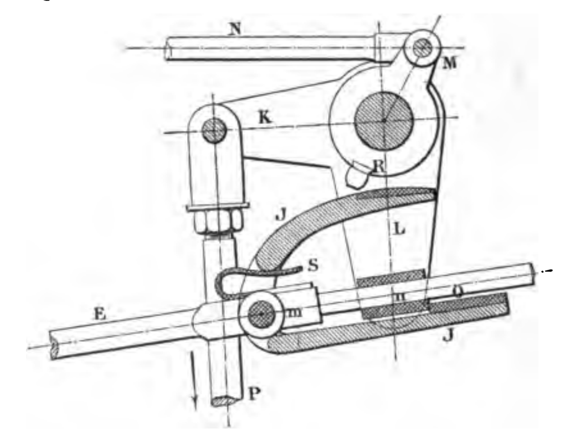


Fig. 98. — Déclic Harris Corliss.

Dans la disposition adoptée par le Creusot en 1882 (fig. 99), la bielle de commande (ou de connexion), K, entraîne l'obturateur d'admission, par l'intermédiaire du balancier IL et de la touche M, jusqu'à ce que la butée de O au fond de la coulisse fasse échapper le levier P, tiré par la bielle de rappel Q.

La machine de Farcot (fig. 100) est remarquable par la position des obturateurs dans les fonds du cylindre, ce qui réduit au strict minimum la capacité des lumières. L'obturateur d'échappement pénètre dans le cylindre quand il est ouvert, mais il est refermé avant que le piston ne l'atteigne. L'admission peut varier entre des limites éloignées.

Certaines machines horizontales ont l'obturateur d'échappement placé à côté de l'obturateur d'admission, à la partie inférieure du cylindre; toute la tuyauterie est au-dessous du parquet de la machine. Dans la machine Wheelock, les obtu-

rateurs ont été remplacés par des tiroirs plans à grille, placés de même côte à côte.

La distribution de Stoppani comporte des obturateurs oscillants concentriques : l'obturateur extérieur agit comme un tiroir ordinaire réglant l'échappement et donnant une

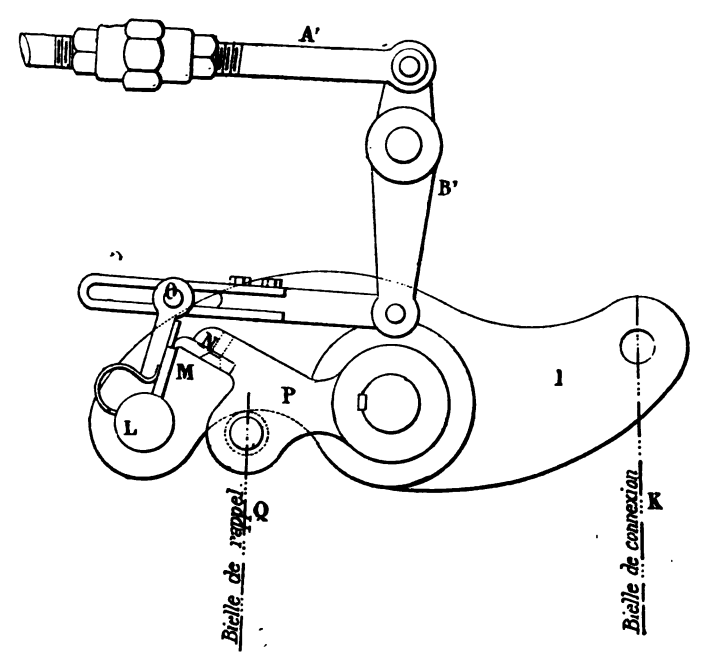


Fig. 99. — Machine Corliss construite au Creusot en 1882; commande de l'obturateur d'admission.

grande admission, coupée par la fermeture à déclic de l'obturateur intérieur.

Dans les machines compound, l'admission au petit cylindre est variable par l'action d'un régulateur; mais l'admission au grand cylindre est le plus souvent fixe, et se fait par l'action d'une butée réglable à la main. Le volume admis dans le grand cylindre doit en effet être à peu près

égal au volume du petit cylindre, ce qui exclut une grande variation de la période d'admission au grand cylindre. La machine à triple expansion de Dujardin, à deux groupes

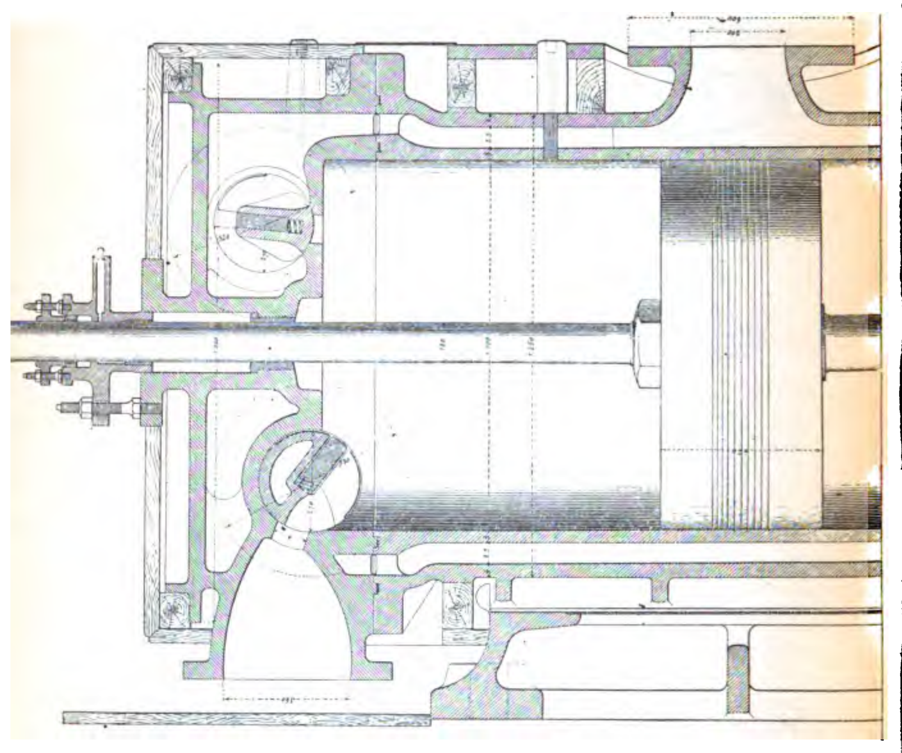


Fig. 100. — Distributeurs de la machine de Farcot, placés dans les fonds du cylindre : la vapeur pénètre d'abord dans l'enveloppe par une tubulure placée à la partie supérieure ; l'échappement se fait à la partie inférieure du cylindre ; l'obturateur d'échappement pénètre en partie à l'intérieur du cylindre, à la place occupée par le piston à fond de course.

tandem, a une admission variable par le régulateur au premier cylindre, une admission avec déclic et butée réglable à la main au second cylindre ; les obturateurs des deux der-

niers cylindres n'ont pas de déclic, et sont sous la commande constante de l'excentrique, comme les distributeurs mentionnés au paragraphe suivant.

54. Distributeurs oscillants et tournants. — Certaines machines à rotation rapide ont les distributeurs séparés et oscillants des Corliss, mais sans déclic : ils restent constamment sous la dépendance de l'excentrique, pour l'admission comme pour l'échappement. On fait souvent usage d'excentriques séparés (fig. 101).

Un obturateur oscillant unique peut aussi remplacer le tiroir plan.

La distribution des machines Biétrix est effectuée par une véritable clef de robinet, animée d'un mouvement continu de rotation.

55. Distributions à soupapes. — La soupape simple est un disque qui recouvre un orifice circulaire et qu'on peut soulever perpendiculairement au plan de cet orifice : des guides empêchent le déplacement transversal. Elle est chargée par la différence des pressions sur ses deux faces ; aussi ne convient-elle pas pour la machine à vapeur, parce que l'effort nécessaire pour la soulever serait en général excessif[1]. On préfère la soupape à double siège, ou *de Cornouailles* (fig. 102), chargée seulement par les pressions verticales qui s'exercent sur les sièges (surface comprise entre deux cercles concentriques de diamètres D_1 et D_0 sur la figure). La petite différence de diamètre des deux sièges permet la mise en place et l'enlèvement ; une certaine charge est d'ailleurs utile pour assurer la fermeture. Sauf de rares exceptions, la soupape s'ouvre verticalement et de bas en haut.

[1] Les soupapes simples sont employées dans les moteurs à gaz. En ce qui concerne l'admission, aucune pression ne s'oppose à l'ouverture, qui est souvent automatique. Pour l'échappement, la pression qui charge la soupape au moment de l'ouverture se trouve réduite par la détente des gaz.

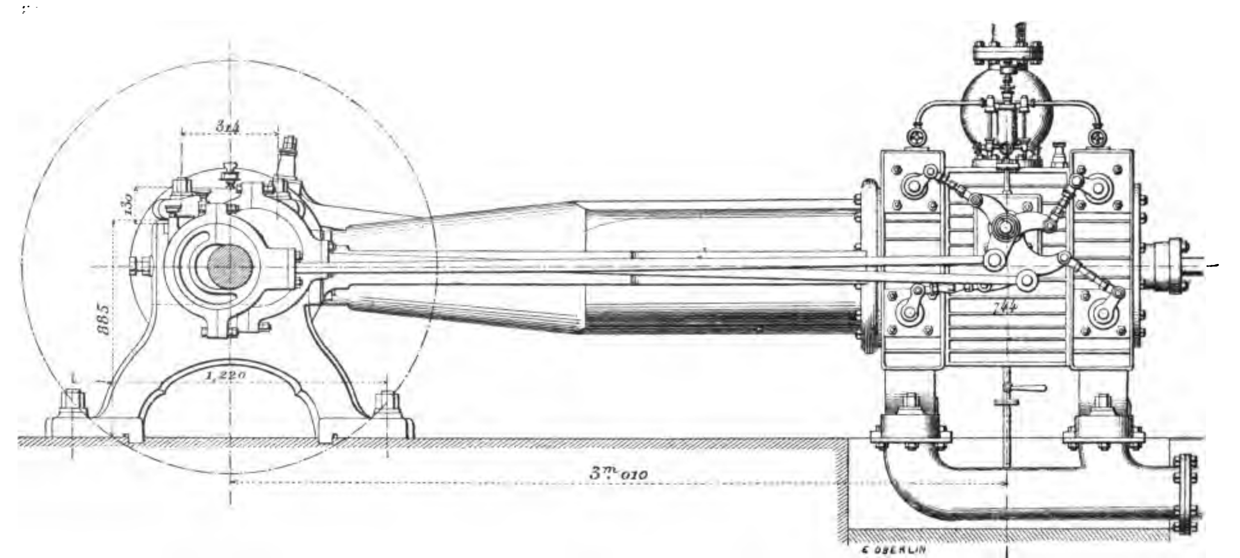


Fig. 101. — Machine rapide à quatre distributeurs, sans déclenchement, construite par E. Garnier en 1889; nombre de tours par minute, 180 ; régulateur de Porter, non représenté sur la figure, agissant sur une soupape placée à l'arrivée de vapeur; excentrique à calage variable commandant les distributeurs d'admission; excentrique à calage fixe our les distributeurs d'échappement.

La disposition de la soupape et des sièges est intervertie dans le type de la figure 103 : la vapeur a librement accès à l'intérieur de la soupape; le siège supérieur a le plus grand diamètre.

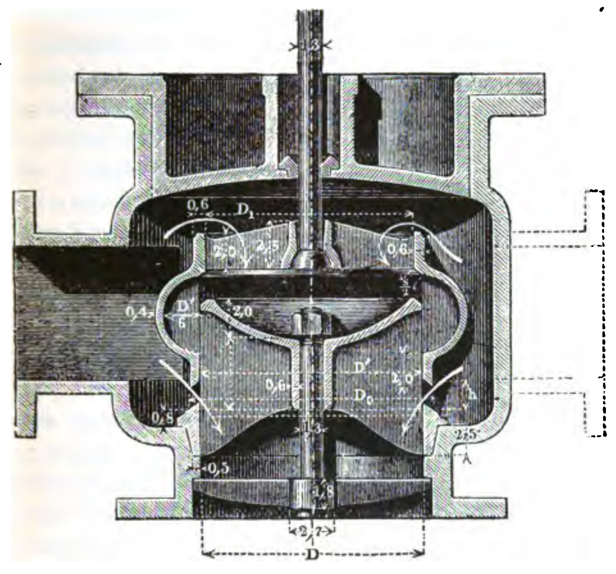


Fig. 102. — Soupape de Cornouailles, à double siège.

Comparée à la soupape simple, la soupape à double siège ouvre une section de passage deux fois plus grande, pour une même levée. Certaines machines ont même des soupapes à quadruple siège, formées par la réunion de deux soupapes creuses à double siège, fondues en une seule pièce (fig. 114).

Une exécution très précise est nécessaire pour que la soupape porte également sur les deux ou sur les quatre sièges. De plus, cette portée égale, obtenue à froid, doit se maintenir en service à chaud, malgré les dilatations. Cela conduit à l'emploi du même métal, souvent la fonte et même la fonte provenant d'une même coulée, pour la soupape et

pour le siège : des métaux différents donneraient des dilatations inégales et la portée ne se ferait plus que sur un seul siège.

En donnant un sommet commun aux deux cônes dont une portion constitue les sièges, on s'affranchit de l'effet des dilatations inégales de la soupape et des sièges (à condition que la température soit la même dans toute la masse) : en se dilatant, la soupape reste géométriquement semblable à elle-même, et les angles des cônes qui reposent sur les sièges ne changent pas, ce qui assure le contact.

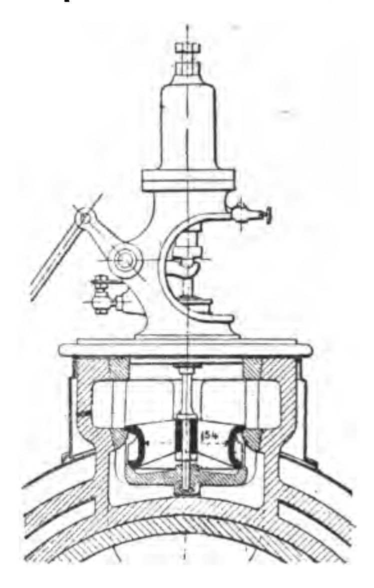


Fig. 103. — Soupape à double siège, type tubulaire, avec ressort et dash-pot (dans l'enveloppe cylindrique supérieure).

Comme organe de distribution, la soupape présente deux particularités importantes. Elle ne sert qu'à une fonction unique, et ne peut produire alternativement l'admission et l'échappement, comme le tiroir : il faut des soupapes séparées pour ces deux phases de la distribution, c'est-à-dire quatre soupapes pour un cylindre à double effet. D'autre part, au moment de la fermeture, la soupape est arrêtée et reste immobile pendant toute la durée de cette fermeture, tandis que les tiroirs et les obturateurs oscillants peuvent continuer leur course.

Les mécanismes de commande des soupapes présentent trois dispositions principales. Un arbre à cames soulève la tige de la soupape et la laisse descendre (par l'effet de son

poids et d'un ressort) ; le petit rayon de la came correspond à la fermeture, le grand rayon à l'ouverture complète, et les courbes de raccordement au soulèvement et à l'abaissement. La tige de la soupape n'est pas directement au-dessus de la came, dont le mouvement est transmis par des tiges articulées sur des balanciers ou des équerres de renvoi.

Le levier roulant (fig. 104) donne une excellente solution, fréquente dans les machines de construction récente. L'extrémité A du levier est articulée sur la tige XY de la soupape, guidée en ligne droite ; l'extrémité B reçoit un mouvement de commande d'une tige BC. Le levier s'appuie, par une surface courbe de grand rayon, sur un plan fixe (ou sur une surface présentant aussi une courbure légère). La fermeture de la soupape ne gêne nullement le mouvement de l'extrémité B du levier, qui se soulève au-dessus de son support. Au moment de l'ouverture, le point d'appui du levier est très voisin de l'extrémité A, de sorte que la commande, en B, s'exerce sur un grand bras de levier, et la résistance, en A, sur un petit bras ; une fois la soupape décollée, le point d'appui se rapproche de l'extrémité B, ce qui augmente la vitesse de soulèvement. Pendant la fermeture, la marche de la soupape, approchée rapidement du siège, puis fermée avec douceur, est également satisfaisante.

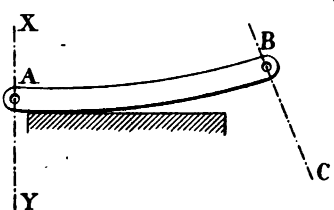


Fig. 104. — Levier roulant, pour la commande d'une soupape suivant XY.

La figure 114 montre l'application de ce système à une soupape d'admission et à une soupape d'échappement ; les plans fixes ont une disposition de réglage.

Une variante de ce mécanisme (fig. 105) comporte deux leviers articulés en O et O′, l'un commandé par la tige BC, l'autre agissant sur la tige XY de la soupape par une articulation A qui présente un léger jeu transversal ; ces deux

leviers se touchent par des faces à courbure de grand rayon.

Les mécanismes à déclic se prêtent à la commande des soupapes d'admission : au moment voulu, la tige de commande abandonne la soupape, qu'un ressort referme brusquement, et la reprend plus tard. Cette fermeture brusque comporte une difficulté spéciale, qui n'existe pas avec les obturateurs Corliss, libres de continuer leur course après la fermeture : il faut éviter un choc destructeur sur les sièges. On cherche à la fois à fermer rapidement la soupape, et à la poser doucement sur son siège. On y arrive par l'emploi d'amortisseurs, qui

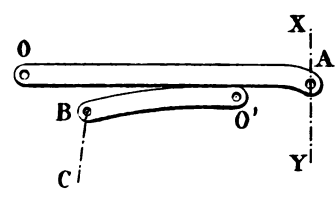


Fig. 105. — Leviers roulants avec deux articulations fixes, O et O'.

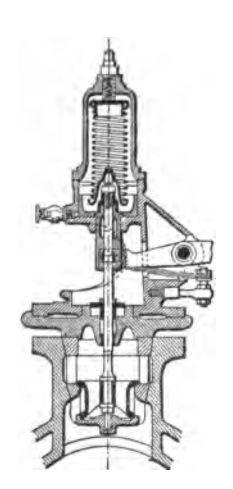


Fig. 106. — Dash-pot à air, pour fermeture à déclic de soupape.

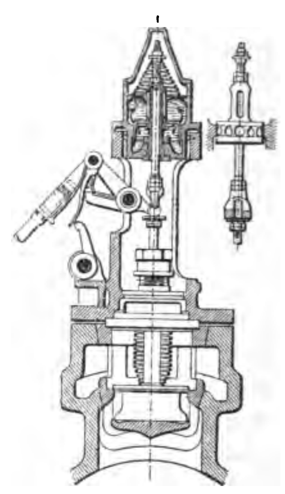


Fig. 107. — Amortisseur à huile pour soupape à déclic (machine Collmann).

ralentissent la soupape pendant un très petit parcours avant la fermeture complète. C'est souvent un dash-pot à air (fig. 106)[1], c'est-à-dire un piston dans un cylindre ; le piston ne doit pas reposer sur le fond du cylindre pendant la fermeture, car il risquerait d'empêcher le contact de la soupape et de ses sièges. L'air comprimé sous le piston s'échappe par un robinet dont l'ouverture est réglable ; une petite soupape, contenue dans ce robinet, laisse rentrer l'air plus librement pendant la levée du piston. Une enveloppe commune enferme le ressort qui accélère le mouvement de fermeture et le piston qui l'amortit.

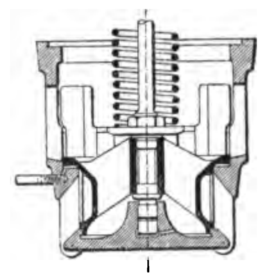


Fig. 108. — Soupape avec amortisseur à vapeur : un disque, fondu avec la soupape, s'engage dans un cylindre correspondant, en emprisonnant la vapeur, qui s'échappe par une ouverture réglable (figurée à gauche).

L'amortisseur peut être un piston dans l'huile, avec ouvertures ne laissant qu'un passage très réduit vers la fin de la course (fig. 107).

La vapeur peut servir d'amortisseur (fig. 108) ; la soupape est surmontée d'un disque qui s'engage comme un piston dans un logement cylindrique voisin du siège, un instant avant la fermeture. La vapeur est emprisonnée dans ce piston annulaire ; elle s'échappe par le jeu qui peut exister tout autour du disque et par un trou dont on peut régler la section.

La soupape ne donne lieu à aucun frottement, sauf celui de la tige de commande dans sa garniture. Elle peut faire un long service, pourvu que des chocs répétés à la fermeture ne produisent pas le mattage des portées. Elle convient

[1] Cette figure. ainsi que les figures 107 et 108, est empruntée à l'excellent ouvrage de M. Carl Leist (die Steuerungen der Dampfmaschinen, Berlin, 1900), où ces questions sont étudiées avec grand détail.

pour l'emploi de fluides à haute température, qui nuiraient au fonctionnement des distributeurs frottants, en détruisant les matières de graissage. C'est pour ce motif que la soupape est employée dans les moteurs à gaz; pour la même raison, elle convient pour les machines à vapeur surchauffée.

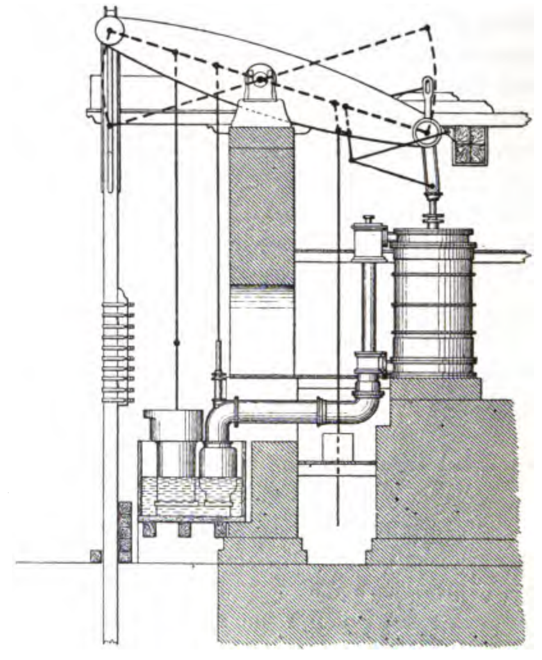


Fig. 109. — Machine de Cornouailles, pour l'épuisement des mines.

La distribution par soupapes a été employée dans l'ancienne *machine de Cornouailles* (fig. 109), qui a remplacé la machine primitive de Newcomen. Le piston travaille à simple effet pour soulever une maîtresse tige, qui redescend par son poids en refoulant l'eau dans les pompes. Trois soupapes effectuent la distribution : une *soupape d'admission* au-dessus du piston ; une *soupape d'équilibre*, qui fait commu-

niquer les deux faces du piston ; une *soupape d'échappement*, qui met le bas du cylindre en relation avec le condenseur.

Le piston étant en haut de sa course et la machine arrêtée, toutes les soupapes sont fermées ; celles d'échappement et d'admission s'ouvrent, et le piston se met en marche. Quand il a parcouru une fraction de sa course, la soupape d'admission se ferme et la détente commence. Lorsque le piston arrive vers le bas de sa course, la soupape d'échappement se ferme, puis celle d'équilibre s'ouvre ; le piston remonte sans produire de travail, la vapeur passant d'un côté à l'autre du piston. Quand il approche du fond de course supérieur, la soupape d'équilibre se ferme et la vapeur est comprimée pendant le reste du parcours. Après un arrêt plus ou moins long, la machine repart de même.

Les machines modernes, à double effet, comportent quatre soupapes par cylindre. Dans les machines horizontales, les soupapes d'admission sont au-dessus du cylindre, et les soupapes d'échappement au-dessous. Dans les machines pilon, la soupape d'admission et la soupape d'échappement sont généralement placées l'une au-dessus de l'autre dans une boîte appliquée contre le cylindre.

La distribution de la plupart des machines à soupapes comporte un arbre auxiliaire placé auprès du cylindre et tournant avec la même vitesse que l'arbre principal, qui le commande par engrenages [1].

Cet arbre porte des cames ou des excentriques, quelquefois les deux à la fois (cames pour l'échappement, excentriques pour l'admission avec déclic). Souvent il y a des

[1] Dans les machines horizontales, cet arbre est placé comme l'arbre de distribution des moteurs à gaz. Mais pour ces moteurs, qui fonctionnent suivant le cycle à quatre temps, correspondant à deux tours de l'arbre principal, l'arbre auxiliaire a une vitesse angulaire réduite à moitié, tandis qu'elle est la même que pour l'arbre principal dans la machine à vapeur.

excentriques séparés pour l'admission et l'échappement, soit quatre excentriques sur l'arbre.

Les cames peuvent donner l'admission variable et le changement de marche. Par exemple, dans la machine Audemar (fig. 110), la soupape est soulevée pendant que l'arbre tourne de l'angle 6-2. Qu'on imagine, pour l'admission, une série de cames voisines présentant des angles 6-2 ayant tous un point de départ 6 commun, mais une ouverture variable ; en substituant ces cames l'une à l'autre, on changera la période d'admission. Or la substitution des cames est aisée : en les plaçant l'une à côté de l'autre, on forme un manchon à profil continu, qu'il suffit de faire glisser sur l'arbre.

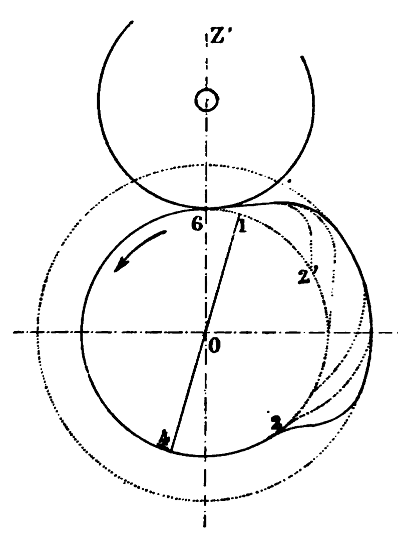


Fig. 110. — Cames pour soupape d'admission de la distribution Audemar : l'admission a lieu pendant le parcours angulaire variable 1 à 2 (admission anticipée, 6-1).

En réduisant l'angle 6-2, on arrive à un *point mort* où il est nul : au delà, on peut reproduire un tracé symétrique, correspondant à la marche en sens contraire. Les manchons qui commandent les deux soupapes d'échappement se déplaceront avec les deux autres : ils ne présentent de changement de profil que de part et d'autre du point mort.

Les excentriques employés dans les machines à soupapes présentent des combinaisons variées et intéressantes. Dans

l'application usuelle de l'excentrique à la commande du tiroir, et des obturateurs Corliss, on utilise le mouvement rectiligne alternatif de l'extrémité A de la barre d'excentrique (fig. 111), guidée suivant une droite XY qui passe par le centre de rotation O. Au lieu de glissières qui réalisent ce mouvement rectiligne, on guide aussi le point A par un levier oscillant, qui lui fait parcourir un arc de cercle très

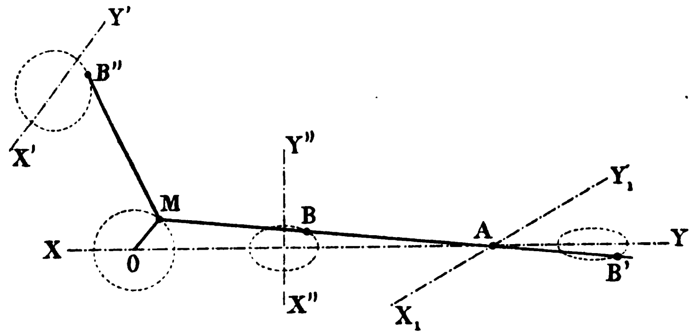


Fig. 111. — Commande d'une tringle par un point quelconque d'une barre d'excentrique, sur l'axe de la barre (B ou B') ou hors de l'axe (B''). L'extrémité A se meut sur une droite d'orientation quelconque.

voisin de la droite XY; cela ne change guère la loi du mouvement. Mais, au lieu de se limiter à l'extrémité A, on peut utiliser le mouvement d'un point quelconque de la barre d'excentrique situé sur l'axe de la barre, en B ou en B', ou bien dehors, par exemple en B''. Chacun de ces points décrit une courbe fermée, dont la projection sur XY est égale au diamètre de l'excentrique (2 OM). Le point ainsi choisi commande une bielle dont l'autre extrémité décrit une droite d'orientation quelconque, telle que X'Y', X''Y''. Mais le point A n'est pas nécessairement guidé suivant XY ; on peut l'astreindre à décrire une droite oblique X_1Y_1 (ou un arc de cercle voisin), ce qui modifie le mouvement communiqué par le point B, B' ou B''. Enfin on peut faire varier l'orientation de la droite X_1Y_1. Cette combinaison est

celle de la distribution Marshall (p. 137). Cette variation de la droite X_1Y_1 peut être obtenue par l'action d'un régulateur, pour modifier les périodes d'admission.

Dans tous les cas, le mouvement obtenu se rapproche de celui que donnerait un excentrique fictif, qu'il est assez facile de déterminer.

En général les distributions par soupapes donnent des périodes d'admission variables; aucune variation n'est nécessaire pour l'échappement.

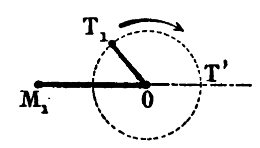


Fig. 112. — Calage d'un excentrique (réel ou fictif), commandant une soupape d'admission à déclic, suivant un angle aigu en avant de la manivelle motrice.

Avec les mécanismes à déclic, l'emploi d'un excentrique spécial pour chaque soupape permet de caler l'excentrique (réel ou fictif) d'une soupape d'admission suivant une direction telle que OT_1 (fig. 112), faisant un angle aigu avec la manivelle motrice, c'est-à-dire avec un angle d'avance négatif (l'angle d'avance étant l'excès de l'angle TOM sur un angle droit). La soupape s'ouvre (ou vient de s'ouvrir s'il y a admission anticipée) quand le centre de l'excentrique est en T_1, et on dispose, pour produire le déclenchement par la rencontre d'une butée à position variable, de tout le parcours angulaire T_1OT', au lieu d'être limité à un parcours inférieur à un angle droit, comme dans la Corliss ordinaire, avec excentrique unique. On obtient ainsi des périodes d'admission variables entre des limites étendues, en donnant à l'angle TOM une valeur suffisamment petite.

A titre d'exemple, les figures 113 et 114 représentent la distribution d'une machine compound tandem ayant figuré à l'exposition universelle de 1900.

Sur la figure 113, on voit comment l'extrémité de la barre d'excentrique, dont la poulie est calée sur l'arbre auxiliaire (à droite sur la figure) commande, par un levier roulant, la soupape d'échappement, au-dessous du cylindre.

Un point voisin du collier du même excentrique commande la soupape d'admission, non directement, mais par l'intermédiaire d'un renvoi qui est sous la dépendance du régula-

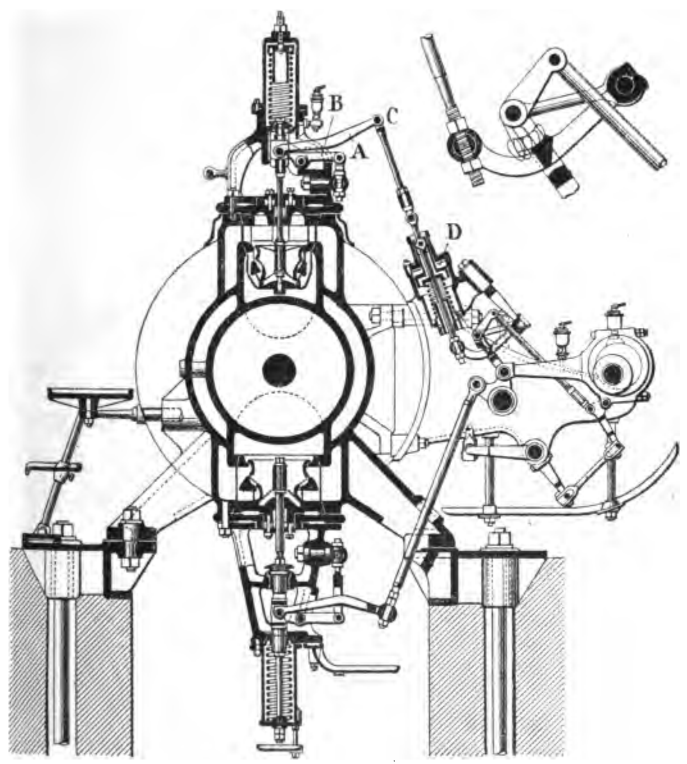


Fig. 113. — Machine tandem de 750 chevaux indiqués, par les frères Sulzer : coupe transversale par le cylindre à haute pression, et détail du mouvement de déclic. Diamètre, 525 mm ; course, 1 100 mm ; nombre de tours par minute, 100 ; soupapes à quadruple siège ; commande par leviers roulants, avec déclic à la soupape d'admission.

teur de la machine. Le régulateur, non figuré, fait tourner l'arbre placé vers la partie inférieure du mécanisme : cela revient à modifier la position du point de l'excentrique qui

commande l'admission. L'amortisseur à air de la soupape,

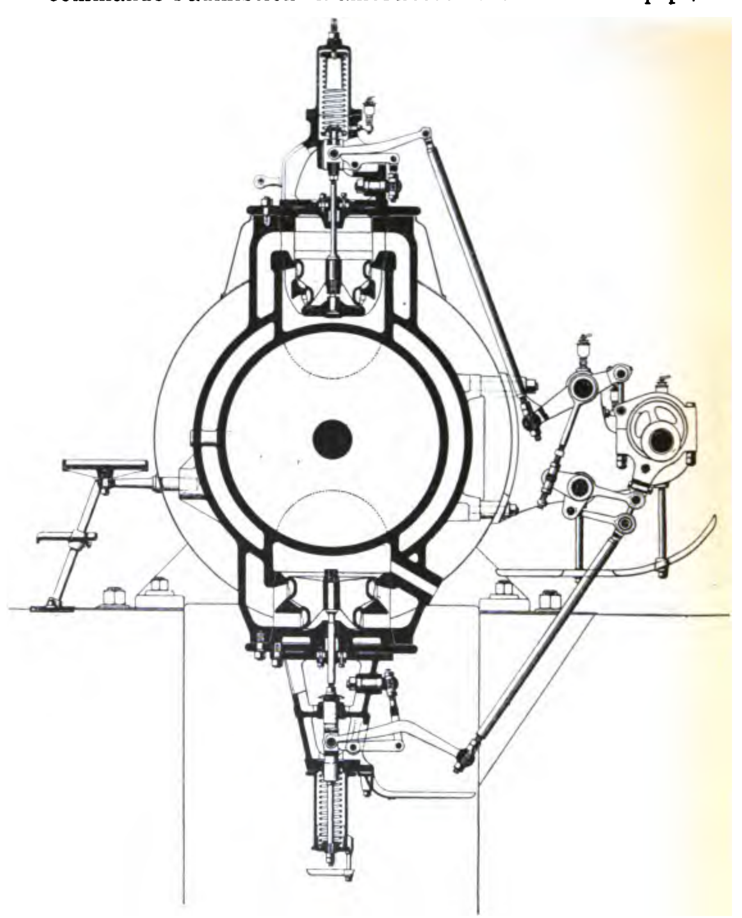


Fig. 114. — Machine tandem des frères Sulzer : coupe transversale par le cylindre à basse pression ; diamètre, 875 mm. Commande des deux soupapes par deux points différents d'une même barre d'excentrique, un à l'extrémité, l'autre sur le collier.

au lieu d'être monté sur sa tige verticale, à la manière habituelle, est placé en D sur une tringle qui actionne la

soupape par un levier roulant CA : le petit excès de course qui en résulte pour le piston de l'amortisseur lui permet d'aspirer une quantité d'air suffisante, même avec les plus courtes admissions. La marche de cette machine à l'Exposition était remarquablement silencieuse.

La figure 114 montre la commande, par un même excentrique, de la soupape d'admission et de la soupape d'échappement correspondante du cylindre à basse pression, par l'intermédiaire de leviers roulants.

Le constructeur Van den Kerchove a remplacé les soupapes par des tiroirs cylindriques, jouant devant des lumières annulaires : on réalise ainsi des fermetures rapides sans choc, le piston continuant sa course une fois la fermeture produite. On retrouve dans ce système les frottements supprimés par l'emploi des soupapes.

Pour éviter cet inconvénient, on a construit des pistons distributeurs sans bagues élastiques, mais il est difficile d'admettre qu'on puisse ainsi réaliser normalement et d'une façon permanente une étanchéité suffisante.

56. Machines sans mouvement de rotation. — On emploie fréquemment, pour commander des pompes ou des compresseurs d'air, les machines à *action directe* sans arbre tournant, où le piston à vapeur et le piston foulant sont montés sur une tige unique. La distribution diffère alors de toutes celles qui viennent d'être examinées (à l'exception de la machine de Cornouailles), qui empruntent leur mouvement à l'arbre animé d'une rotation continue. On fait encore usage du tiroir, qu'il s'agit de déplacer quand le piston arrive à ses fonds de course : la détente de la vapeur est en effet souvent sacrifiée dans ces appareils, où la résistance est à peu près constante pendant toute la course et qui n'ont pas de volant.

Dans quelques appareils (petits chevaux alimentaires) le tiroir est manœuvré par un levier contre lequel bute la tige de piston à fond de course ; mais l'arrêt de la machine est à

craindre, si la vitesse est insuffisante pour pousser complètement le tiroir, et s'il reste arrêté dans sa position moyenne. Aussi préfère-t-on souvent commander le tiroir par un piston à vapeur auxiliaire, jouant dans un cylindre où le piston principal distribue la vapeur, en manœuvrant un organe de petites dimensions; tel est le cas de certaines pompes et des compresseurs montés sur les locomotives pour actionner les freins à air comprimé.

La machine élévatoire de Worthington se compose de deux groupes semblables réunis sur un bâti commun; le piston d'un groupe commande le tiroir de l'autre d'un mouvement continu : lorsqu'un piston est au milieu de sa course, l'autre piston est au fond de la sienne, et son tiroir, au milieu de sa course, est sur le point d'ouvrir l'admission.

Chaque lumière est divisée en deux conduits, servant l'un pour l'admission, l'autre pour l'échappement. Le conduit d'échappement débouche à une certaine distance du fond du cylindre, ce qui laisse une chambre où le piston comprime la vapeur : il est ainsi certainement arrêté, même en cas de retard dans la manœuvre de son tiroir. Un obturateur oscillant se trouve sur le conduit d'admission : il est relié à la tige du piston, qui le ferme en un certain point de sa course et le rouvre en temps utile, avant le commencement d'une course nouvelle, en repassant au même point. On obtient ainsi la détente de la vapeur. On peut être surpris de la précision avec laquelle les deux groupes croisent leurs mouvements, sans être réunis par une liaison mécanique, telle qu'un arbre avec deux manivelles à angle droit : on s'explique aisément cette précision en remarquant que si l'un des pistons arrive un peu trop tôt à fond de course, il ne repart qu'au moment où son tiroir et par conséquent l'autre piston passent par une position déterminée.

Dans certaines machines Worthington, la même distribution est réalisée à l'aide de quatre obturateurs oscillants

par cylindre ; deux de ces obturateurs remplacent le tiroir ordinaire et sont commandés de même par le piston de l'autre cylindre. La machine est souvent compound ou à triple expansion, avec deux groupes de deux ou trois cylindres en tandem.

57. Contre-vapeur. — On fait quelquefois fonctionner à *contre-vapeur*, pour produire un travail résistant, les moteurs à changement de marche, notamment les locomotives et les machines d'extraction. Le tiroir est alors conduit par l'excentrique de marche arrière, tandis que la machine tourne en avant. Pour déterminer la distribution obtenue dans cette marche, il suffit d'appliquer les tracés qui servent à l'étude de la distribution normale, avec un excentrique dont l'angle d'avance δ dépasse l'angle droit (fig. 115). Ces tracés montrent, sur une face du piston, l'*admission* pendant le parcours angulaire 1 — 2, la *détente* pendant 2 — 3, l'*échappement anticipé* pendant 3 — 4, l'*échappement* pendant 4 — 5, la *compression* pendant 5 — 6 et l'*admission anticipée* pendant 6 — 1. Les lettres accentuées s'appliquent à l'autre face du piston. Les périodes d'échappement anticipé et d'admission anticipée occupent alors une fraction considérable de la course.

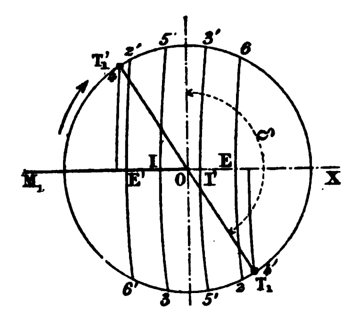


Fig. 115. — Étude de la distribution dans la marche à contre-vapeur, par le tracé ordinaire : l'angle d'avance δ de l'excentrique est plus grand qu'un angle droit.

En comparant cette distribution anormale à celle que donne le même excentrique pendant la marche arrière, on reconnaît que les phases s'intervertissent, pendant les mêmes parcours du piston, effectués en sens contraires : ce qui était admission devient admission anticipée; ce qui était

détente devient compression : ce qui était échappement devient échappement anticipé et *vice versa*.

Pour prévoir le travail absorbé par la contre-vapeur, on

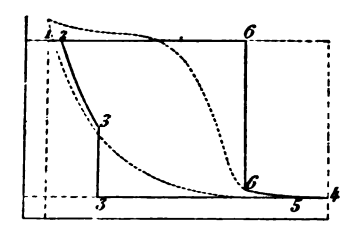


Fig. 116. — Diagrammes de contre-vapeur, sans laminage (trait plein), et avec laminage (trait ponctué).

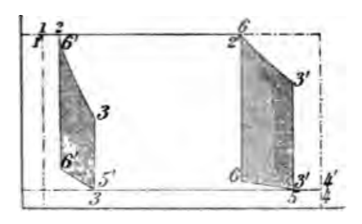


Fig. 117. — Diagrammes comparés de la contre-vapeur (1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 6, 1), et de la marche normale (1′, 2′, 3′, 3′, 4′, 5′, 6′, 6′, 1′), sans laminages ; les hachures montrent la différence des deux surfaces.

trace d'abord le diagramme d'indicateur sans laminage (tracé 1-2-3-3-4-5-6-6-1 de la figure 116), puis avec laminage (trait ponctué). Le laminage réduit la surface du diagramme de sorte que le travail résistant diminue quand la vitesse augmente.

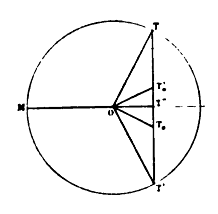


Fig. 118. — Excentriques fictifs de la marche directe (T à T_0) et de la marche à contre-vapeur (T_0 à T′). Dans l'autre sens de rotation, T′ à T_0' et T_0' à T.

En comparant ce travail résistant au travail moteur donné par le même excentrique en marche normale (fig. 117), on trouve souvent qu'il est moindre, aussi bien sans laminages qu'avec laminages.

La manœuvre de l'arbre de reievage déplace le centre de l'excentrique fictif de T à T′ (fig. 118) : la période d'admission diminue à mesure qu'il se rapproche de la position médiane T″. La distribution donnée par l'excentrique fictif T″ (point mort de la coulisse), est remarquable ; les périodes d'admission et d'ad-

mission anticipée, d'échappement anticipé et d'échappement, deviennent égales et correspondent aux mêmes parcours du piston en sens contraires. Le diagramme sans laminage est 1-2-3-5-4-5-6-2-1 (fig. 119) ; le diagramme avec laminage est couvert de hachures. Ce diagramme ne se produit que si le tiroir présente une avance linéaire, qui est la plus grande ouverture de la lumière à l'admission.

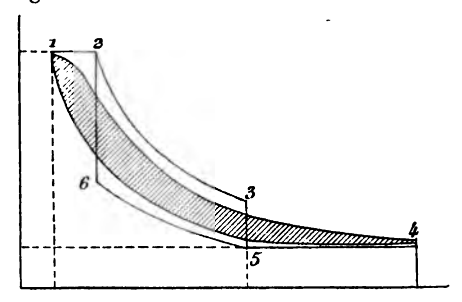


Fig. 119. — Diagramme de la distribution par un excentrique avec avance angulaire de 90°.

L'excentrique fictif OT″, exactement opposé à la manivelle motrice, donne la même distribution, avec même travail moteur, pour la marche avant et pour la marche arrière.

Quand le centre de l'excentrique fictif dépasse T″ en se rapprochant de T (fig. 118), la surface du diagramme diminue, mais elle représente encore un travail moteur, jusqu'à une position T_0 où cette surface s'annule algébriquement : le travail résistant pendant le retour du piston compense alors le travail moteur de l'aller. Au delà de T_0, les différences changent de sens et l'excentrique donne un travail résistant de plus en plus grand à mesure qu'il se rapproche de T′.

Pour l'autre sens de marche, on a de même une zone $T'T'_0$ de la coulisse qui donne un travail moteur et une zone plus courte, T'_0T, qui donne un travail résistant[1].

[1] Les circonstances spéciales qui accompagnent la marche à contre-vapeur des locomotives sont étudiées dans « la machine locomotive », par E. Sauvage.

58. Démarrage. — Pour qu'une machine se mette en marche, il ne suffit pas que la vapeur pénètre dans le cylindre et en presse le piston ; il faut que l'effort sur l'arbre, produit par cette pression, soit suffisant pour surmonter les résistances, fort variables, qui s'opposent à son mouvement. Tantôt ce ne sont guère que les résistances passives des appareils ; tel est le cas des laminoirs, de l'hélice des bateaux ; tantôt, au contraire, il faut, dès le premier instant de la mise en marche, produire un travail considérable ; c'est ainsi qu'une machine d'extraction enlève une charge au bout d'un câble tendu, qu'une locomotive entraîne un train dont les attelages sont serrés.

Il faut aussi, dans certains cas, que le démarrage se fasse immédiatement et sans hésitation dans toutes les positions de la machine ; ou il suffit qu'il soit facile dans la plupart des positions, sans qu'une difficulté de mise en marche qui se produira quelquefois ait un très grand inconvénient ; ou bien enfin on est libre de placer d'avance la machine dans la position la plus favorable pour le démarrage : ainsi les moteurs d'ateliers, qui ne sont mis en marche que deux ou trois fois par jour, sont arrêtés dans une position favorable, ou déplacés au préalable à l'aide de *vireurs*, commandés à bras d'hommes ou par un moteur auxiliaire, agissant sur la jante du volant. Ces appareils doivent être disposés de manière que les hommes ne risquent pas d'être blessés au moment où la machine se met en marche. Ils sont surtout utiles pour la manœuvre à froid des appareils, lors des réparations.

La connaissance de la distribution d'une machine permet d'apprécier exactement les conditions de démarrage. Cette distribution est ici supposée faite par tiroir ordinaire ; les mêmes considérations conviennent d'ailleurs pour les autres mécanismes.

L'effort moteur est transmis à un arbre tournant ; la résistance à vaincre peut être assimilée à une force tangentielle agissant à l'extrémité du rayon R de la manivelle. Dans une

position quelconque de la machine (fig. 120), on démontre que la force tangentielle F, qui fait équilibre à une poussée ou à une traction P agissant sur le piston, est égale à $P \times \frac{OG}{R}$, OG étant la longueur interceptée par l'axe de la bielle AM sur une perpendiculaire en O à l'axe du cylindre[1], et R le rayon de la manivelle, OM. Quand P est constant la force F est précisément proportionnelle à la longueur OG.

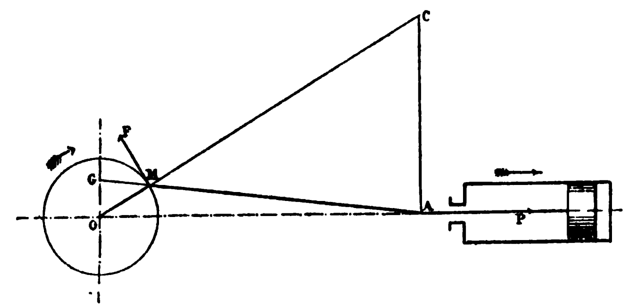


Fig. 120. — Équilibre de l'effort du piston et de la résistance à l'extrémité de la manivelle ; la force F est égale à la force P sur le piston multipliée par le rapport $\frac{OG}{OM}$.

Lors de la mise en marche d'une machine, la force P, qui pousse le piston, est égale à la pression disponible de la vapeur admise dans le cylindre, multipliée par la surface du piston, moins la contre-pression sur l'autre face, qui sera généralement due à l'atmosphère. Dans une machine à condensation, il arrive souvent que le condenseur ne donne pas encore une pression réduite à la mise en marche. Cette force P n'existe pas si le piston est arrêté dans une position telle que la vapeur ne pénètre pas dans le cylindre. Elle peut même être de sens contraire à celle qui produirait la rotation qu'on veut obtenir, si la machine est dans la position d'admission anticipée.

[1] C étant le *centre instantané* de rotation de la bielle, $F \times CM = P \times CA$, et, dans les triangles semblables CAM et OGM, $\frac{CA}{CM} = \frac{OG}{OM}$.

Un seul cylindre ne produisant aucun effort, ou seulement un faible effort, lorsque la manivelle est arrêtée dans le voisinage de ses points morts, on voit que la facilité du démarrage exige au moins deux cylindres, dont les pistons attaquent deux manivelles calées à angle droit. En appliquant la règle qui vient d'être indiquée, on détermine aisément, pour une série de positions de la machine, le *moment moteur* $F \times R + F' \times R$, qui résulte de l'action des deux pistons produisant respectivement les forces F et F'.

La position la plus défavorable est celle où le piston d'une des manivelles cesse de recevoir la vapeur : cette manivelle n'agit plus et l'autre ne produit pas encore son plus grand effort. Les distributions qui donnent de très longues périodes d'admission réduisent cet effet fâcheux.

Pour le démarrage, comme pour le travail produit en marche, c'est le *volume* seul du cylindre, ou produit de la surface du piston par sa course, qui importe. A égalité de volume, la force P, qui est proportionnelle à la surface du piston, est en raison inverse de la course ou bien du rayon de manivelle ; la force F varie de même, mais le produit $F \times OM$ reste constant.

Quand les deux cylindres, qui attaquent les manivelles calées à 90°, sont ceux d'une machine compound, les conditions de démarrage se modifient. Si la manivelle du cylindre à haute pression est arrêtée dans une position telle qu'il n'entre pas de vapeur dans ce cylindre, ou si l'effort de ce piston est insuffisant, on introduit directement la vapeur dans le réservoir intermédiaire, à une tension réduite. Le cylindre à basse pression se trouve alors placé, pour le démarrage, comme le serait le second cylindre de la machine double à deux cylindres simples ; mais l'introduction de vapeur dans le réservoir réagit sur le premier piston ; elle pénètre par l'échappement du cylindre à haute pression et y augmente la contre-pression. Si le piston du petit cylindre est arrêté dans la zone de l'échappement anticipé sur une face, et de la compression sur l'autre, la vapeur qui afflue du

réservoir exerce une action motrice. Mais si ce piston se trouve dans la zone de détente, non seulement il ne reçoit pas l'action motrice de la vapeur de la chaudière, mais encore il est poussé à contre-sens par la vapeur du réservoir. Le moment moteur peut alors se trouver beaucoup réduit.

Plusieurs dispositifs, évitant cette difficulté de démarrage, ont été imaginés, surtout pour les locomotives compound.

On peut isoler complètement les deux cylindres, en donnant un échappement indépendant au cylindre à haute pression : c'est le dispositif de M. Mallet. Un tiroir spécial ou un appareil équivalent établit à volonté la communication de l'échappement du cylindre à haute pression avec le réservoir ou avec l'extérieur ; on emploie souvent dans ce cas un *détendeur* pour établir dans le réservoir une pression convenablement réduite.

On se contente quelquefois d'un clapet qui peut fermer la communication du réservoir avec l'échappement du cylindre à haute pression : ce clapet empêche la vapeur envoyée dans le réservoir de refluer au cylindre à haute pression, et se rouvre automatiquement par l'effet de l'échappement de ce cylindre.

Dans certaines machines on peut établir à volonté, à l'aide d'un tuyau muni d'un robinet, ou autrement, une communication entre les deux côtés du cylindre à haute pression ; on annihile ainsi complètement l'effet de ce cylindre.

Les difficultés de démarrage disparaissent ou se réduisent beaucoup quand l'admission dans chaque cylindre peut se faire pendant la course presque entière.

59. Comparaison des systèmes de distribution. — L'étude géométrique des distributions, au moyen d'épures, permet de tracer le tableau de la distribution, indiquant, en centièmes de la course, les parcours du piston pendant les diverses phases. Mais ces tableaux ne suffisent pas pour

apprécier la distribution réelle, affectée par les laminages plus ou moins grands, qui dépendent de la vitesse de la machine, de la section des passages de vapeur et de la nature du mouvement des obturateurs. D'une manière générale, on peut considérer deux types de diagrammes, le diagramme avec laminage, donné par les distributions à tiroirs, surtout sur les machines rapides, et le diagramme sans laminage des Corliss et des machines à soupapes à marche lente.

La figure 121 montre deux diagrammes de ce genre : AB

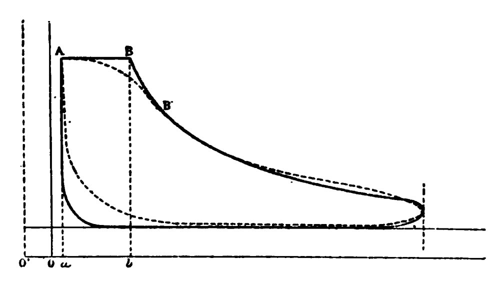


Fig. 121. — Comparaison des diagrammes donnés par les mécanismes de distribution à déclenchement et à mouvement continu : en plein, diagramme sans laminage, avec espace libre égal à O*a*; en ponctué, diagramme avec laminage : espace libre O'*a*. Même admission apparente dans les deux cas, bien qu'elle cesse respectivement en B et en B'.

est l'admission sans laminage, AB' l'admission avec laminage, notablement plus longue, et cependant ne correspondant pas à une plus grande quantité apparente[1] de vapeur. Les espaces libres sont O*a* et O'*a*, le plus grand étant celui de la machine à tiroir. C'est à cause de cet espace libre plus grand que la courbe de détente en ponctué, de la machine à laminage, est figurée au-dessus de la courbe en trait plein ; le volume de vapeur qui se détend, comprenant l'espace

[1] Par quantité apparente on entend celle que montre le diagramme pendant l'admission : il s'y ajoute une certaine quantité condensée sur les parois.

libre, est plus grand dans la première machine. Cet espace libre plus grand augmentera d'ailleurs la dépense de vapeur par coup de piston, si la compression ne le remplit pas entièrement, compression faite d'ailleurs aux dépens du travail moteur. Le diamètre et la course étant les mêmes dans les deux machines, on voit que le laminage réduit le travail par coup de piston.

CHAPITRE VI

RÉGULARISATION ET TRANSMISSION DU MOUVEMENT

60. Pièces à mouvement alternatif. — Pour connaître l'effort moteur exercé à chaque instant par une machine, il faut d'abord savoir quelle est la force qui agit sur le piston dans chacune de ses positions ; on suppose qu'il s'agit d'une machine à un seul cylindre. Cette force se détermine facilement par le relevé des diagrammes aux deux extrémités du cylindre : pour une position quelconque du piston, les diagrammes font connaître la pression sur ses deux faces : la différence de ces deux pressions (kg par cm^2), multipliée par la surface du piston (cm^2), donne la force cherchée[1].

Par exemple les deux diagrammes, placés comme sur la figure 122 (partie supérieure), permettent de déterminer aisément, en chaque point de la course, la différence des pressions qui agissent sur le piston ; cette différence est portée perpendiculairement à la base XY (partie inférieure de la figure), qui représente la course du piston, en dessus ou en dessous, suivant sa direction. Ce tracé montre que, dans l'espèce, l'effort change de sens avant la fin de la course du piston, à cause de la forte compression de la vapeur.

Mais la *force d'inertie* des masses à mouvement rectiligne, piston, tige, crosse de piston, petite tête de bielle, vient modifier la force ainsi calculée, surtout dans les machines rapides. Ces masses ont un mouvement tantôt accéléré et

[1] Ce calcul suppose même surface utile des deux faces du piston ; la présence de la tige d'un des côtés, ou d'une tige et d'une contre-tige de sections différentes, introduit une légère différence, dont il est facile de tenir compte.

tantôt ralenti : une certaine force est absorbée pour produire cette accélération puis restituée pendant le ralentissement. Cette force, ainsi absorbée et restituée au passage, diminue et augmente périodiquement celle qui résulte des pressions

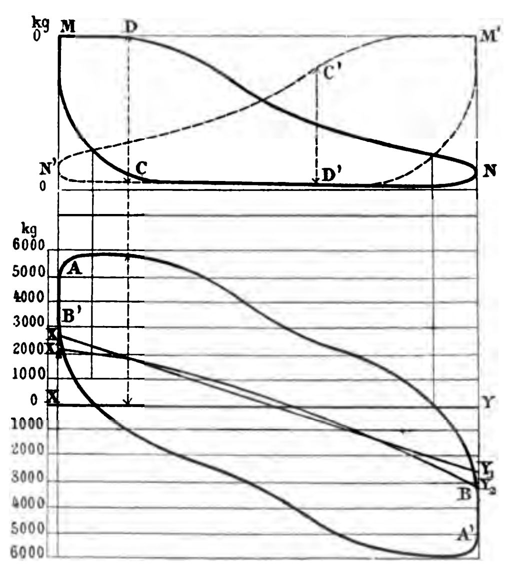


Fig. 122. — Diagrammes des efforts transmis à la manivelle motrice ; à la partie supérieure de la figure, diagrammes d'indicateur sur les deux faces du piston. XY étant la course du piston, les hauteurs, comptées perpendiculairement à XY, figurent, pour chaque point de la course, la force qui résulte de la différence des pressions sur les deux faces du piston, pressions données par les deux diagrammes d'indicateur. Mais, à cause de la force d'inertie du piston et des autres pièces qui se meuvent avec lui, la force nette est différente et se compte, sur les perpendiculaires à XY, à partir de la droite X_1Y_1, ou, plus exactement, de la courbe X_2Y_2.

de la vapeur. Les règles de la mécanique permettent de la calculer aisément, du moins quand l'arbre tourne avec une vitesse uniforme, condition souvent réalisée à peu près.

Cette *force d'inertie* prend ses plus grandes valeurs quand le piston passe par ses fonds de course ; elle tend à rappro-

cher le piston de l'arbre quand il est au fond de course le plus voisin de cet arbre, et à l'éloigner quand il passe au fond de course le plus éloigné; elle est plus grande à ce fond de course le plus éloigné qu'à l'autre, et la différence s'accuse quand la longueur de la bielle, en fonction de la manivelle, diminue.

On arrive à une construction qui représente la force nette, transmise par le piston, par une hauteur comptée non plus à partir de la base XY, qui figure la course du piston, mais à partir de l'oblique X_1, Y_1, ou même, plus exactement, à partir de la courbe X_2 Y_2[1]. La figure montre qu'avec des valeurs convenables de la vitesse et de la masse des pièces, les forces se rapprochent de l'uniformité[2]. La force subit en outre un certain déchet par suite du frottement du piston et de sa tige.

La machine est supposée horizontale; quand elle est verticale, le poids des pièces mobiles diminue la force motrice pendant la course montante, et l'augmente pendant la course descendante.

Pour éviter les chocs dans les articulations, il convient que les changements de sens des efforts ne soient pas trop brusques : cette condition est assez bien remplie dans le cas de la figure 122; le renversement des efforts se produit aux fonds de course.

La force tangentielle, qui fait tourner l'arbre, se déduit de

[1] La droite X_1 Y_1 suppose une bielle très longue; la courbe X_2 Y_2 tient compte de l'obliquité qu'elle prend dans son mouvement, à cause de sa faible longueur.

[2] Les données de la figure 122 sont les suivantes :

Diamètre du piston	370 mm	
— de la tige	57 —	
Course du piston	330 —	
Nombre de tours par minute	300	
Longueur de la bielle	825 mm	
Poids du piston avec tige et tête	125 kg	
— de la bielle	80 —	dont 32 kg attribués au piston.
Force produisant l'accélération aux fonds de course	120 — 3 180 —	

la force qui vient du piston, correction faite de l'effet de la force d'inertie, par la règle indiquée au § 58, c'est-à-dire en multipliant la force après correction par le rapport $\frac{OG}{OM}$ (fig. 120).

61. Volants. — En appliquant les règles indiquées au paragraphe précédent, on trouve que la force tangentielle, qui fait tourner l'arbre, est loin d'être uniforme pendant un tour. A certains moments, elle s'annule et peut même deve-

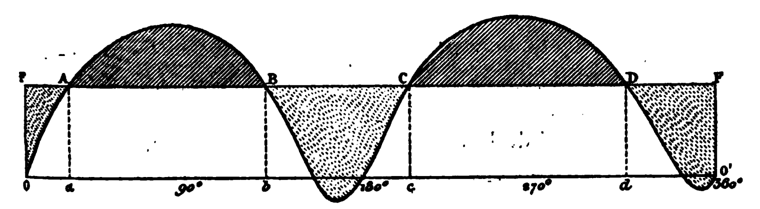


Fig. 122 *bis*. — Efforts, moteur et résistant, sur l'arbre d'une machine à un cylindre ; la force motrice tangentielle est représentée par des perpendiculaires à la base 0° — 360°, qui figure la circonférence développée ; la courbe montre les variations de cette force. La force tangentielle résistante, supposée invariable, est figurée en chaque point de la base par une hauteur telle que *a*A.

nir négative ou résistante. La figure 122 *bis* représente les variations de cette force pendant un tour : la circonférence entière est développée suivant la base 0° — 360° et la force en chaque point est représentée par une perpendiculaire à cette base : on obtient ainsi une courbe, qui passe en dessous de la base quand la force devient négative. La surface comprise entre cette courbe et la base représente, à une échelle facile à déterminer, en déduisant les parties négatives en dessous de la base, le travail produit pendant un tour.

Le travail résistant des appareils commandés, auquel s'ajoute celui des résistances passives du moteur, peut de même varier suivant une loi connue pendant un tour : une surface limitée par une courbe et par l'axe OO' le représentera. Parfois à peu près uniforme, il est figuré par un rectangle OFF'O'.

Dans la marche à l'état de régime, le travail moteur pendant un tour est égal au travail résistant : la surface du rectangle OFF'O' est égale à la valeur *algébrique* de la surface OABCDO'.

Lorsque le travail moteur surpasse le travail résistant, la vitesse de la machine, et de tous les mécanismes qu'elle entraîne, augmente, pour se ralentir quand la différence des travaux est en sens inverse. Cette augmentation ou cette diminution de la vitesse dure tant que la différence des travaux reste de même sens. C'est donc pour les positions de la manivelle correspondant aux points A et C (fig. 122) qu'auront lieu les *minima*, et aux positions B et D les *maxima* de vitesse.

L'uniformité de la vitesse de rotation de l'arbre, supposée plus haut, serait donc loin d'être réalisée, si on n'ajoutait à l'arbre de lourdes masses tournantes, constituant le *volant*, qui régularisent le mouvement autant qu'on le désire dans chaque cas.

L'effet utile d'un volant dépend de ce qu'on appelle son *moment d'inertie*[1]. Le moment d'inertie, qui dépend de la masse et du carré du rayon, sera le même pour un volant lourd de petit rayon, et pour un volant de grand rayon et relativement léger. Or le poids du volant est supporté par les paliers dans lesquels tourne l'arbre, et il en résulte une perte de travail par frottement. Il y a donc intérêt à employer le volant léger, qui donne moins de travail de frottement par tour. Mais avec le rayon, pour une vitesse angulaire donnée, augmente la vitesse à la circonférence, qui ne peut dépasser une certaine limite, sous peine de soumettre le métal à des tensions excessives et dangereuses. Avec la fonte, généralement employée, on se limite généralement à une vitesse linéaire de 35 m par seconde à la circonférence. Les tensions dans le métal augmentent comme le carré de

[1] Si m est la masse d'une portion du volant, située à une distance r du centre, la somme de tous les produits tels que mr^2 est le moment d'inertie.

la vitesse, qu'il serait par suite dangereux de trop laisser s'accroître. Cet accroissement de vitesse peut se produire si la résistance vient à disparaître : la machine, tournant à vide, risque alors de s'emballer, si des dispositions spéciales de sécurité ne s'y opposent.

En employant un métal plus résistant que la fonte, on peut augmenter la vitesse de marche des volants.

Quand la machine a deux cylindres agissant sur deux manivelles, on évalue l'effort produit par chacun d'eux au même instant, puis on ajoute ces efforts simultanés (fig. 123).

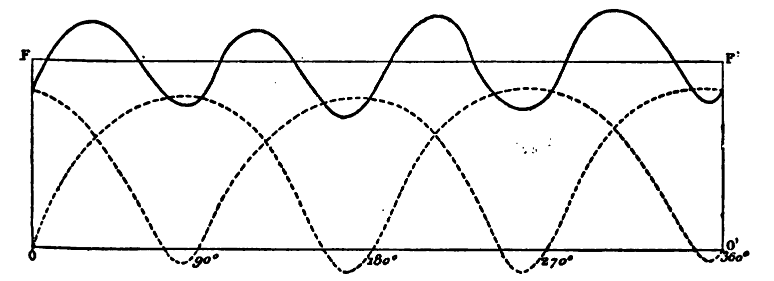


Fig. 123. — Machine à deux cylindres avec manivelles à angle droit; tracé des variations de l'effort moteur pendant un tour.

Les deux cylindres sont indépendants ou successifs. Un volant beaucoup plus faible suffit à donner la même régularité, à cause de la moindre variation de l'effort moteur.

Des tracés analogues s'appliquent aux machines à trois manivelles (machines marines, moteurs de laminoirs réversibles, par exemple), qui, même sans volant, tournent assez régulièrement.

Les volants ne servent pas seulement de régulateurs de vitesse angulaire; dans certains cas, on les emploie comme accumulateurs du travail, qu'ils restituent en se ralentissant. Cet emploi est fréquent dans les machines de laminoirs à rotation continue, où les résistances, autres que les frottements, sont intermittentes : pendant que la barre se se profile entre les cannelures du laminoir, la résistance est

très grande, et le volant, en se ralentissant, vient en aide à la machine : il s'accélère de nouveau et recueille le travail disponible dans les intervalles entre les passages des barres. En principe, le fonctionnement reste le même : la différence tient à la valeur des écarts de la vitesse.

62. Action des régulateurs. — Certaines machines, telles que les locomotives, les machines marines, les machines d'extraction, les moteurs de treuil, tournent à des vitesses variables, réglées par le conducteur, qui agit sur la prise de vapeur et sur l'organe de distribution. Mais la plupart des machines fixes doivent tourner à une vitesse déterminée à l'avance, sans trop s'en écarter. Cet effet s'obtient automatiquement par l'action d'un *régulateur*.

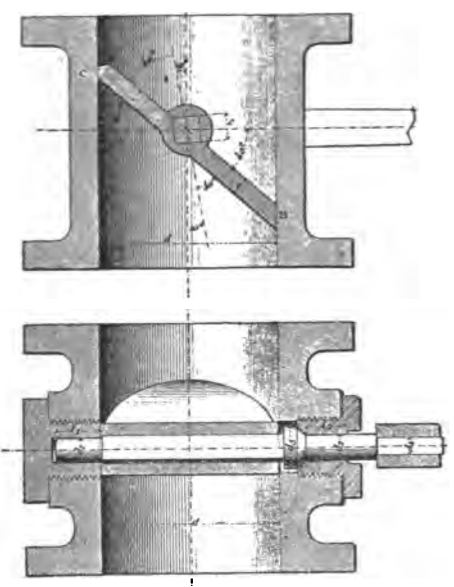


Fig. 124. — Papillon commandé par un régulateur.

Le régulateur fait varier le travail par tour de l'arbre, soit en réduisant la pression de la vapeur amenée au cylindre de la machine, soit en modifiant la longueur de l'admission.

La pression de la vapeur est réduite par un *papillon* tournant autour d'un axe (fig. 124), ou par une *lanterne équilibrée* (fig. 125), qu'un faible effort suffit à manœuvrer. Lorsque ces appareils sont voisins de leur position de fermeture com-

plète, un petit déplacement produit une variation considérable de la pression, tandis qu'ouverts en grand ils sont moins sensibles.

Les mécanismes, qui font varier l'admission de vapeur dans le cylindre, et par suite donnent une détente variable, se voient sur la plupart des machines à déclenchement, telles que les Corliss, et sur certaines machines à tiroirs superposés, Rider, Farcot et autres.

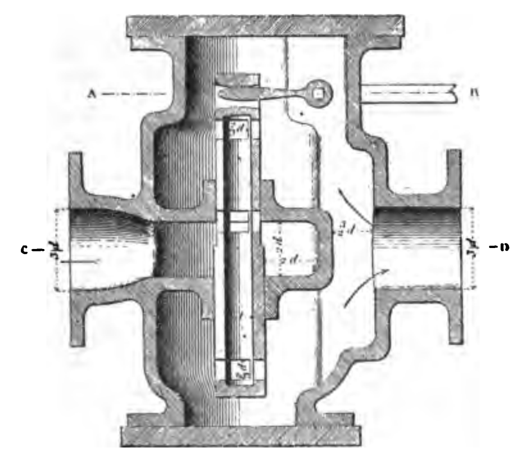


Fig. 125. — Lanterne équilibrée commandée par un régulateur (d'après G. Marié).

Au point de vue de l'utilisation de la vapeur, la détente variable est en principe préférable au laminage de la vapeur. Mais si les variations de la puissance nécessaire sont faibles, de sorte que la perte de pression par laminage ne soit jamais grande, la consommation de vapeur reste pratiquement la même avec les deux systèmes. On peut donc tirer un bon parti d'une machine réglée par papillon, et munie d'un mécanisme de détente variable à la main, tel que le système Meyer : le régulateur produit les petites variations de puissance, et on ajuste la détente à la main pour les grandes.

Dans le cas exceptionnel où on demande à un moteur une puissance très inférieure à celle qu'il donne normalement, il est souvent avantageux de ne pas recourir à une admission très réduite suivie d'une détente trop prolongée, et, au contraire, d'abaisser par laminage la pression initiale.

63. Régulateurs de Watt et de Porter. — Un régulateur ancien, et fréquemment employé encore, est celui de *Watt*, à force centrifuge. Il consiste (fig. 126) en un axe vertical, tournant avec le moteur qu'il s'agit de régulariser, et qui porte deux bras articulés, AB, AB′, avec les masses C et C′. Les tiges BM et B′M rattachent ces bras au *manchon* M, qui peut coulisser sur l'axe. Quand les boules C et C′ s'écartent de l'axe, le manchon M s'élève, et il descend quand les boules se rapprochent. Le manchon est relié à des tringles qui commandent l'organe de réglage du moteur, papillon ou mécanisme de détente.

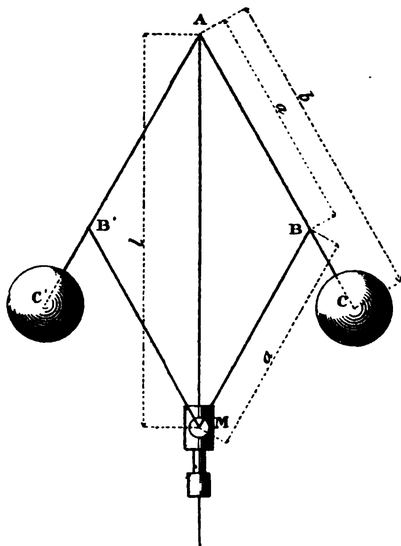


Fig. 126. — Régulateur de Watt.

L'arbre du régulateur est relié à l'arbre du moteur, par l'intermédiaire d'engrenages ou de courroies, de manière à tourner constamment avec la même vitesse, ou à une vitesse proportionnelle.

Pour une certaine vitesse, choisie comme normale, les boules s'écartent d'une quantité déterminée de l'axe du régulateur. Si la vitesse augmente, les boules s'écartent

davantage, et prennent une nouvelle position qu'on peut calculer dans chaque cas d'après les règles de la mécanique. En s'écartant, les boules soulèvent le manchon et agissent sur l'organe de réglage du moteur, de manière à réduire le travail moteur par coup de piston. L'accélération de la machine indique en effet que la puissance motrice est trop forte par rapport à la puissance résistante.

Le ralentissement de la machine, qui résulte d'une insuffisance de puissance motrice, produit le rapprochement des boules du régulateur, l'abaissement du manchon et l'augmentation de la pression de la vapeur ou de la période d'admission.

On voit qu'en réalité ce régulateur ne maintient pas une vitesse constante, mais empêche seulement les écarts de la vitesse, de part et d'autre de la normale, de dépasser certaines valeurs, fixées suivant les cas. Quand une très grande régularité est nécessaire, par exemple pour l'éclairage électrique, la filature, on demande que ces écarts dans un sens ou dans l'autre, ne dépassent pas 1 à 2 p. 100 de la vitesse normale; la plus grande vitesse correspond à la marche à vide de la machine, la plus petite à la charge la plus grande. Pour d'autres applications, on admet des variations jusqu'à 5 p. 100 en plus ou en moins de la normale.

Ces variations dépendent des proportions données aux organes du régulateur, et aussi de l'amplitude utilisée des écarts des boules : elles sont faibles quand une petite différence dans d'écartement des boules correspond à la course complète de l'organe de réglage.

Le travail que peut produire un régulateur, en manœuvrant l'organe de réglage, est minime : aussi dispose-t-on cet organe et ses transmissions pour que la manœuvre n'exige qu'un faible effort; la course est d'ailleurs toujours petite.

Pour la bonne marche de la machine, il importe que l'action du régulateur soit très prompte : c'est une condition que ne réalise pas le *régulateur à embrayage*, qui se contente de mettre l'organe de réglage, par exemple la vis à filets

opposés de la distribution Meyer, en relation avec les pièces en mouvement de la machine : la manœuvre est beaucoup trop lente; le retard qui en résulte dans la modification du travail moteur permet des écarts notables de vitesse et peut donner de grandes irrégularités de marche. S'il est nécessaire de faire produire de grands efforts à un régulateur, on doit lui adjoindre un servo-moteur à action rapide, qui n'a pas les inconvénients de l'embrayage.

Il importe que l'action de l'organe de réglage soit très prompte; toutefois certaines causes de retard sont inévitables. Dans une machine Corliss, dès que l'obturateur d'admission sur un côté du piston vient de se refermer, la vapeur est engagée dans le cylindre et y produit un travail déterminé; il n'y a plus de réglage que sur l'admission suivante, de l'autre côté du piston. Un papillon ne modifie pas instantanément la pression en aval, car une certaine quantité de vapeur l'a déjà dépassé au moment où il agit : aussi importe-t-il que le volume compris entre le papillon et le cylindre soit aussi réduit que possible. Dans les machines à plusieurs cylindres successifs, avec réservoirs intermédiaires, un effet analogue prend une grande importance, quel que soit le mode d'action du régulateur avant l'admission au premier cylindre; la quantité de vapeur engagée dans la machine et qui doit y terminer son évolution est considérable. On n'évite cet effet que par une action simultanée sur l'admission dans chacun des cylindres.

Le volant laisse subsister, pendant chaque tour, de petites variations de vitesse, que ne peut corriger le régulateur, et auxquelles il convient même qu'il ne soit pas sensible, afin de ne pas communiquer continuellement à l'organe de réglage des oscillations inutiles ou nuisibles. Les frottements du mécanisme du régulateur peuvent suffire à empêcher ces mouvements; sinon, on adjoint à ce mécanisme un *frein à huile,* consistant en un piston non jointif dans un cylindre plein d'huile, dont la résistance empêche les mouvements saccadés, sans gêner les déplacements plus lents.

Quand le régime de marche de la machine varie, ce qui correspond à un petit changement de vitesse, un bon régulateur doit passer rapidement et sans oscillations prolongées d'une position de ses boules à une autre.

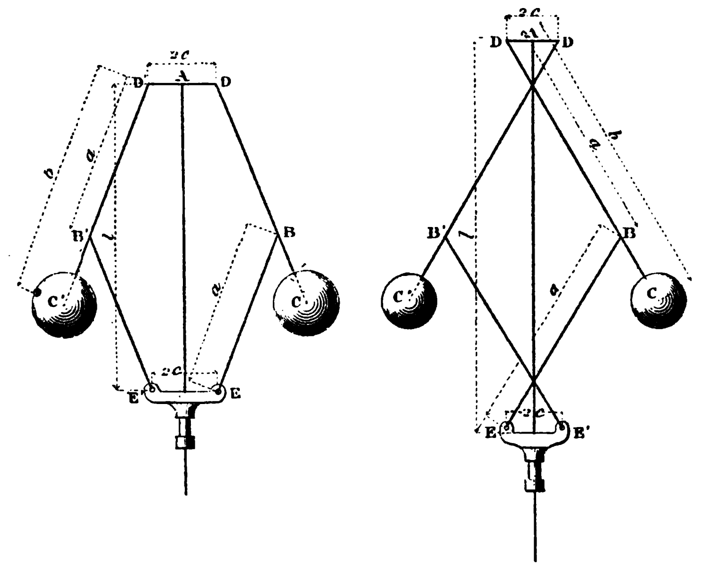


Fig. 127. — Régulateur de Watt avec bras articulés à distance de l'axe vertical tournant.

Fig. 128. — Régulateur de Watt à bras croisés.

Le régulateur de Watt a été modifié de diverses manières : notamment les deux bras s'articulent non pas en A sur l'axe vertical, mais en D et D', à quelque distance de cet axe (fig. 127 et 128). La première de ces dispositions augmente les variations de vitesse qui correspondent à une même différence dans l'écartement des boules; la seconde, celle à *bras croisés*, diminue cette variation.

Le régulateur de *Porter* est caractérisé par l'importance de la masse du manchon (fig. 129). Il doit tourner plus vite que le régulateur de Watt équivalent : la transmission

est installée en conséquence. Avec des dimensions restreintes, il peut exercer en se déformant un travail assez grand. On se rend compte aisément que le manchon demeure suspendu par l'action des masses tournantes, action qui est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire : de petites masses tournant très vite supporteront un lourd manchon, tandis qu'avec une rotation lente, de grosses boules ne tireront qu'un petit manchon. Comme la résistance des mécanismes commandés par l'appareil s'ajoute au poids du manchon ou s'en retranche, on conçoit qu'elle troublera le fonctionnement de l'appareil d'autant moins que ce poids sera plus fort.

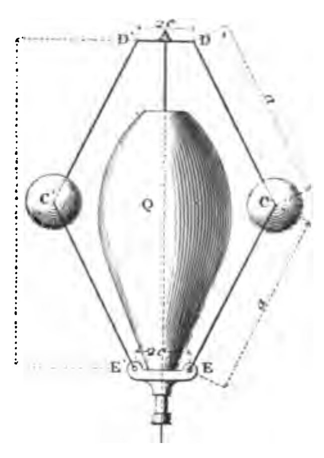


Fig. 129. — Régulateur de Porter, caractérisé par la grande masse du manchon (Q), relativement aux boules C, C'.

64. Types divers de régulateurs. — Il est commode de faire varier à volonté le poids du manchon, suivant les applications du régulateur, de manière à réaliser par tâtonnements la meilleure marche. Certains régulateurs permettent cette variation. Le fonctionnement des régulateurs de Watt et de Porter exige la verticalité de l'axe. En substituant au poids du manchon la tension d'un ressort, l'axe peut être horizontal, ce qui permet de monter directement le régulateur sur l'arbre des machines rapides. Le ressort, en hélice, est monté autour de l'arbre même, avec lequel il tourne, ou bien est intercalé dans la transmission entre les boules tournantes et l'organe de réglage, de sorte qu'il est fixe : il est plus facile d'en régler la tension suivant les cas.

On a quelquefois jugé que la variation de la vitesse, si

faible qu'elle soit, entre la marche à vide et la marche à pleine charge, avait des inconvénients, et on a cherché à réaliser une vitesse constante sous toutes les charges, à l'aide de régulateurs *isochrones*. Mais ces appareils ont en général donné de mauvais résultats, parce qu'une légère variation de la puissance résistante les fait fonctionner avec toute l'amplitude de leur course, de sorte que la pression ou l'admission de vapeur varie entre des limites beaucoup trop étendues.

65. Régulateurs agissant sur l'excentrique. — Le tiroir des machines rapides est souvent commandé par un excentrique

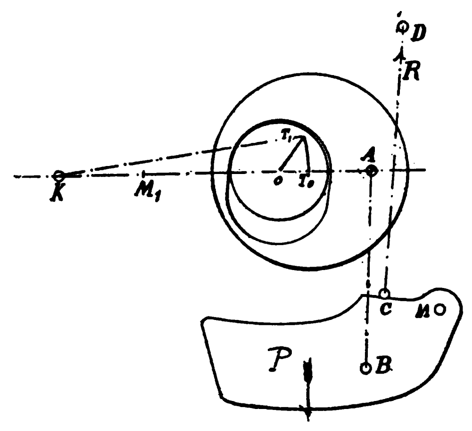


Fig. 130. — Régulateur agissant sur le calage de l'excentrique : le centre de l'excentrique peut se déplacer de T_1 à T_0, sous l'action combinée de la masse P et du ressort R.

à rayon et calage variables, en relation avec un régulateur (fig. 130) : O étant le centre de l'arbre, il s'agit de déplacer le centre de la poulie d'excentrique de T_1 à T_0, quand on veut passer du maximum au minimum d'admission. Cette poulie est articulée autour d'un centre K, qui tourne avec l'arbre. Une masse P, articulée autour d'un axe H, tend à s'écarter du centre O pendant la rotation du système, en

entraînant le centre de la poulie d'excentrique vers T_0; mais

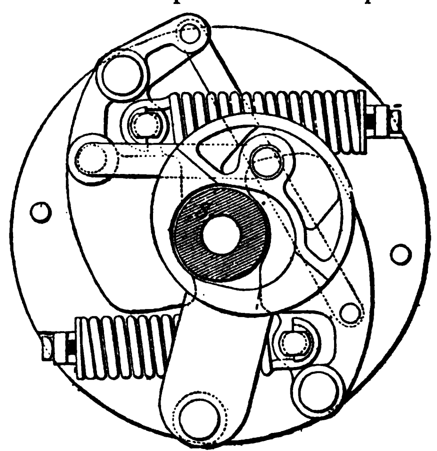


Fig. 131. — Régulateur de la machine Westinghouse : admission la plus grande; vitesse minima.

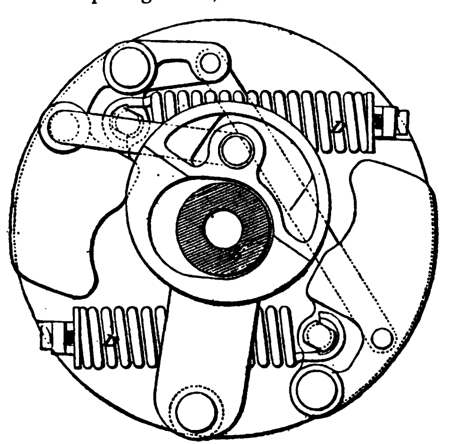


Fig. 132. — Régulateur de la machine Westinghouse : admission la plus petite; vitesse maxima; les poids articulés sont aussi écartés et les ressorts aussi tendus que possible.

un ressort antagoniste la rappelle en sens contraire, en tirant suivant CD.

Pour chaque vitesse de rotation, entre deux limites voisines, il s'établit une position d'équilibre relatif du système, et le centre T de l'excentrique s'arrête en un point déterminé entre T_1 et T_0. A la plus petite vitesse correspond la position T_1 du centre qui donne la plus grande admission ; à la plus grande vitesse, la position T_0, qui donne la plus petite admission.

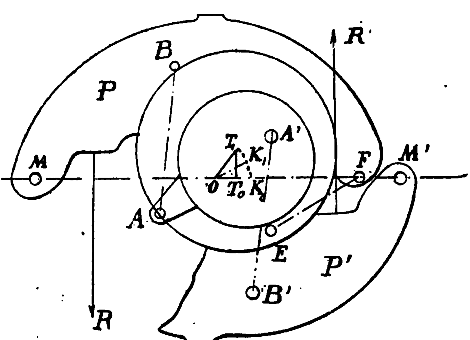


Fig. 133. — Régulateur agissant sur le calage de l'excentrique, à deux poulies superposées : une première poulie peut tourner sur l'arbre, de K_1 à K_0 ; la seconde tourne sur la première, ce qui en amène le centre de T_1 à T_0. Ces deux poulies sont en relation avec les deux masses symétriques P, P', articulées en M, M', qui s'écartent quand la vitesse augmente, et sont appelées par les ressorts R, R'. L'une de ces masses tire la première poulie par une bielle BA ; l'autre masse tire la seconde poulie par B'A'.

On ajoute une seconde masse P' avec son ressort R', symétrique par rapport à l'axe O, afin de doubler les forces en jeu et d'éviter le *balourd* de l'arbre. On peut aussi ne monter qu'un seul ressort, réunissant les deux poids et n'ayant pas d'attaches fixes.

Les figures 131 et 132 donnent un exemple du système avec deux ressorts.

D'autres dispositions produisent des effets analogues : parfois on fait usage de deux poulies superposées (fig. 133), pouvant être déplacées en sens inverse sous l'action des contrepoids rappelés par ressorts. Le collier d'excentrique

est monté sur la poulie extérieure, dont le centre peut se

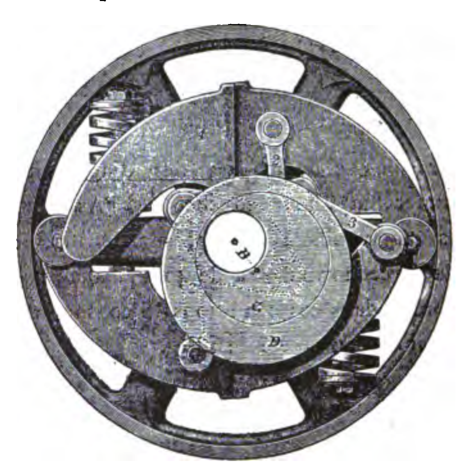


Fig. 134. — Régulateur de la machine Armington et Sims, donnant la plus grande admission ; vitesse minima.

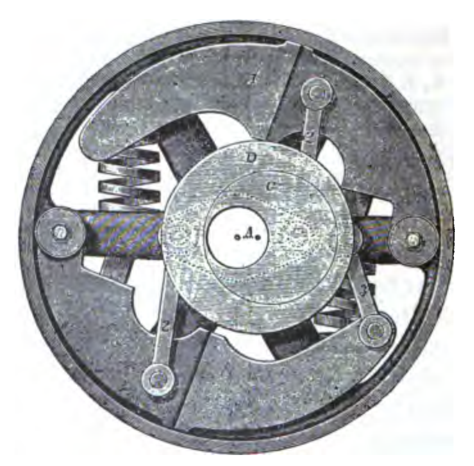


Fig. 135. — Régulateur de la machine Armington et Sims, donnan la plus petite admission ; vitesse maxima.

déplacer de T_1 à T_0, tandis que le centre de la poulie inté-

rieure, montée sur l'arbre, va de K_1 à K_0. Telle est la disposition de la machine Armington et Sims (fig. 134 et 135).

Pour que les systèmes de ce genre fonctionnent bien, il faut que l'action du régulateur soit très puissante par rapport à la résistance du tiroir : cette résistance pourrait, en effet, agir sur l'excentrique dont elle modifierait le calage, et la distribution en serait troublée. Aussi fait-on usage de tiroirs équilibrés ou cylindriques. La masse doit en être aussi faible que possible, pour atténuer l'effet des forces d'inertie ; on cherche aussi à réduire au minimum le frottement de la tige dans la garniture.

Quelquefois on munit le régulateur d'un frein à huile, monté dans le volant qui l'entraîne, frein qui s'oppose à tout déplacement brusque des pièces, et notamment au décalage de la poulie par suite de la résistance du tiroir.

66. Transmission du travail moteur. — Il importe que la transmission du mouvement des moteurs aux appareils actionnés soit aussi simple et directe que possible. Si l'appareil actionné doit recevoir un mouvement rectiligne alternatif, comme le piston d'une pompe, on peut le commander directement par le piston moteur; souvent on conserve l'arbre avec le volant, pour la régularité de la marche et la commande de la distribution, mais dans certains cas on supprime cet organe.

Beaucoup d'appareils doivent recevoir un mouvement de rotation, machines dynamo-électriques, ventilateurs, pompes centrifuges, roues de locomotives, hélices de navire. Autant que possible, on égalise les vitesses de rotation du moteur et de l'appareil commandé, ce qui permet l'emploi d'un arbre commun.

Quand on ne peut pas réaliser cette égalité de vitesse, un intermédiaire, engrenage, courroie, câble, est nécessaire ; il en est de même quand il s'agit de faire tourner des arbres de transmission, chargés de distribuer la puissance motrice à des appareils multiples ; cependant la commande

de tels arbres par les moteurs est quelquefois directe.

Les engrenages réalisent exactement le rapport prévu pour les vitesses de rotation des deux axes.

La transmission par courroie exige une forte tension, souvent trois fois plus grande que celle qui serait strictement nécessaire s'il n'y avait aucun glissement à craindre sur les poulies, comme dans la transmission par chaîne sur roues dentées[1]. Cet excès de tension fatigue l'arbre, le fait fléchir et augmente la perte de travail par frottement dans les paliers.

De plus, il est nécessaire que les deux arbres reliés par la courroie soient suffisamment éloignés, sinon il est presque impossible de maintenir la courroie convenablement tendue.

Connaissant la force à laquelle la courroie est soumise, on calcule aisément la section transversale à lui donner (produit de la largeur par l'épaisseur) sachant que chaque mm^2 ne doit pas porter plus de 0,4 kg.

On réduit la force à transmettre par une courroie et la tension qui est proportionnelle à cette force, en augmentant le diamètre des poulies, et par suite la vitesse de translation de la courroie pour une même vitesse angulaire. En doublant le diamètre des poulies, on réduit à moitié la section nécessaire pour la courroie. On atteint avantageusement une vitesse de 20 à 25 m par seconde.

Pendant l'arrêt de la transmission, les deux brins sont également tendus ; pendant la marche, la tension du ***brin moteur*** est plus forte que celle du ***brin de retour***. Sous ces

[1] Dans ce dernier cas, le calcul de la tension est facile quand on connaît la puissance transmise, la vitesse de l'arbre et le diamètre de la poulie qu'il porte. Soit un cheval à transmettre par une poulie d'un mètre de diamètre, faisant 150 tours par minute. La chaîne se déplace à la vitesse de $\frac{3,14 \times 150}{60}$ ou 7,85 m par seconde. Le travail par seconde, produit de la force par le parcours, étant de 75 kgm, la force, c'est-à-dire la tension de la chaîne, est égale à $\frac{75}{7,85}$ ou 9,55 kg. Le brin de retour n'est soumis à aucune tension.

tensions variables, la courroie s'allonge inégalement, et de ces variations dans l'allongement résulte un petit glissement inévitable sur les poulies, qui réduit la vitesse de l'arbre commandé, souvent de 2 ou 3 p. 100.

La courroie finit par prendre des allongements permanents qui obligent à la raccourcir, opération difficile sur les grandes courroies.

La tension peut être notablement réduite par l'emploi de *galets enrouleurs*, suivant une disposition de M. le capitaine Leneveu [1]. Le galet augmente beaucoup l'arc de contact de la courroie sur la poulie, et permet de rapprocher autant qu'on le désire les axes des deux poulies. En outre, la section de la courroie est réduite proportionnellement à la tension.

Les deux axes reliés par une courroie sont le plus souvent parallèles et tournent dans le même sens. En *croisant* la courroie, on obtient des rotations en sens inverse, mais cette disposition n'est guère usitée que pour de petites puissances.

A une seule grande courroie, on préfère souvent des câbles ronds en chanvre ou en aloès, qui ont chacun peu d'importance et qu'on peut multiplier autant qu'il est nécessaire. Ces câbles se prêtent à la commande de plusieurs arbres.

Les câbles, dont le diamètre est souvent voisin de 50 mm, s'enroulent dans des gorges, qui augmentent beaucoup l'adhérence, à cause des pressions obliques sur les joues de la gorge : aussi le brin de retour est moins tendu que celui d'une courroie. Il convient que la tension de tous les câbles montés sur la même poulie soient à peu près la même. Les deux extrémités se rejoignent par une *épissure*, qui forme un câble sans fin de section uniforme.

En pratique, on ne constate pas de très grandes différences

[1] Voir *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale*, année 1903, 1er semestre, p. 367.

entre le prix et le rendement[1] des transmissions par courroie et par câbles ; cependant ces dernières paraissent soumettre les arbres à des tractions moindres ; la marche en semble plus douce et l'entretien plus facile. Il est vrai que des différences dans la tension et dans le diamètre de deux câbles d'un même jeu entraînent des glissements, parce que les diamètres d'enroulement, dans les gorges des poulies, ne restent pas identiques.

Comme exemple de transmission de ce genre, on peut citer la poulie-volant d'un moteur de 4 000 chevaux, qui porte 60 câbles ; la largeur est de 4,5 m, le diamètre de 9 m, et le poids de 140 tonnes.

Dans la plupart des ateliers, l'ensemble des transmissions consomme une fraction importante de la puissance des moteurs, fraction qui dépasse souvent de beaucoup les limites qu'on ne supposerait guère pouvoir être atteintes, car elle descend rarement au-dessous de 20 p. 100, elle est souvent comprise entre 20 et 40 p. 100, et elle dépasse fréquemment 40 p. 100. Aussi la distribution de la puissance motrice dans les ateliers doit-elle être étudiée avec le plus grand soin, en recherchant les principales causes de perte de travail, pour les atténuer. Ces relevés sont assez faciles, car il suffit de mesurer à l'indicateur la puissance nécessaire pour la marche en charge et à vide.

[1] Le rendement est le rapport du travail reçu par le second arbre au travail fourni par le premier, la différence étant absorbée par les frottements résultant de la transmission.

CHAPITRE VII

MOTEURS SANS PISTONS

67. Pulsomètres. — Le *pulsomètre* (fig. 136) se compose de deux chambres, en forme de poire, placées debout, l'une contre l'autre, la pointe en haut. La vapeur entre par cette pointe, dans l'une ou l'autre chambre ; à cet effet, une bille ferme alternativement l'une et l'autre ouverture. Chacune des deux chambres porte un clapet d'aspiration et un clapet de refoulement ; les deux clapets d'aspiration s'ouvrent, de bas en haut, dans une cavité où débouche un tuyau d'aspiration, qui plonge dans l'eau qu'on veut élever ; les deux clapets de refoulement envoient de même l'eau dans le tuyau de refoulement. Au lieu de clapets, on emploie des boulets qui fonctionnent de même.

Quand le pulsomètre est en marche, l'une des chambres est pleine d'eau et reçoit la vapeur, dont la pression se transmet à l'eau, qui soulève le clapet et monte dans le tuyau de refoulement. En même temps, la vapeur, en contact avec l'eau et avec la fonte des parois, se condense ; cette condensation devient de plus en plus importante à mesure que l'eau descend dans la chambre, parce que les surfaces de contact de la vapeur avec l'eau et avec les parois augmentent. Comme l'orifice d'entrée de vapeur est petit, il vient un moment où cette condensation croissante produit un appel de vapeur suffisant pour attirer sur son siège la bille de distribution : elle vient boucher cet orifice et démasque celui de l'autre chambre. Une fois la première chambre ainsi isolée, la vapeur achève de s'y condenser : la pression atmosphérique pousse l'eau dans le tuyau d'aspira-

tion et remplit la chambre, en soulevant le clapet d'aspiration. Alors l'entrée de vapeur se ferme dans la seconde chambre, qui fonctionne exactement comme la première, puis les mêmes actions se reproduisent alternativement.

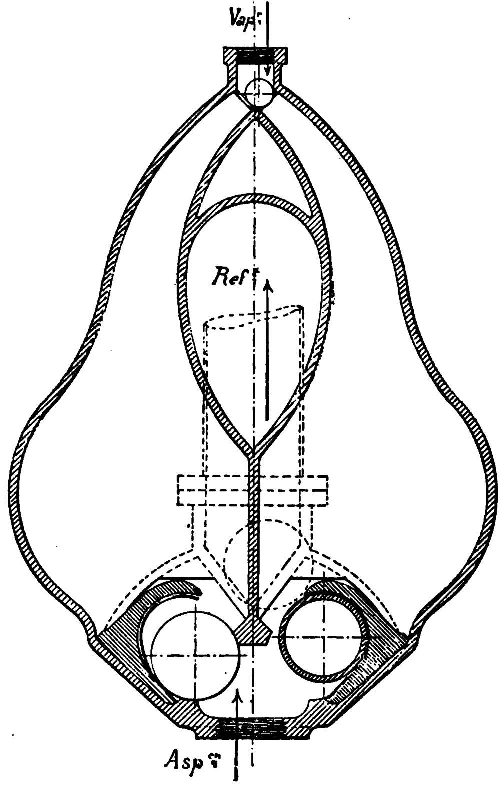


Fig. 136. — Pulsomètre; coupe verticale.

Chacune des chambres est munie d'un petit *reniflard*, dont on peut régler l'ouverture, pour laisser entrer un peu d'air au moment où la condensation se produit : cette entrée d'air amortit les chocs que produirait dans la chambre la masse d'eau brusquement aspirée; le reniflard doit être

d'autant plus ouvert que la hauteur de l'aspiration est moindre.

La pression atmosphérique fait équilibre à une colonne d'eau haute de 10 m, avec le vide par-dessus ; mais, par suite des résistances diverses au passage de l'eau et de la nécessité de la faire monter rapidement dans le tuyau d'aspiration, la hauteur à laquelle un pulsomètre peut aspirer l'eau ne dépasse guère 5 ou 6 m. Quant à la hauteur du refoulement, comptée à partir de l'appareil, elle dépend de la pression de la vapeur, chaque kg par cm² de la pression effective correspondant à une hauteur de 10 m ; comme pour l'aspiration, cette hauteur est en réalité quelque peu réduite.

La dépense de vapeur des pulsomètres est très variable suivant les circonstances de l'emploi : des essais sur un pulsomètre, aspirant l'eau à une profondeur de 3 à 5 m, et la refoulant à une hauteur de 10 à 45 m, avec des débits de 30 à 11 m³ par heure, ont donné des consommations comprises entre 100 et 250 kg de vapeur par cheval-heure effectif en eau élevée. L'eau se trouve en même temps plus ou moins chauffée par la vapeur.

S'il dépense beaucoup de vapeur, le pulsomètre a l'avantage de s'installer très facilement : on peut le descendre dans un puits avec une chaîne, en y rattachant des tuyaux flexibles. Il ne dégage pas de vapeur d'échappement. Il est clair que si l'eau élevée doit être chauffée, la vapeur dépensée est entièrement utilisée.

68. Turbines à vapeur. — La turbine est actionnée par des jets de vapeur qui s'écoulent d'une chaudière dans un condenseur, ou dans l'atmosphère. Ces jets (dans certains cas le jet est unique) sont dirigés, par les aubes fixes d'un *distributeur*, sur les aubes d'une couronne portée par un axe qu'elle fait tourner[1]. Comme dans les turbines hydrauliques,

[1] Comme dans bien d'autres cas, le vocabulaire mécanique usuel manque ici de précision. Par *turbine* on désigne tantôt l'appareil

on cherche à réaliser l'entrée sans choc dans la couronne mobile et la sortie avec une vitesse réduite. Car si le jet de vapeur venait frapper normalement les aubes de la couronne, il la ferait bien tourner en lui communiquant du travail, mais avec une perte importante résultant du choc. Pour

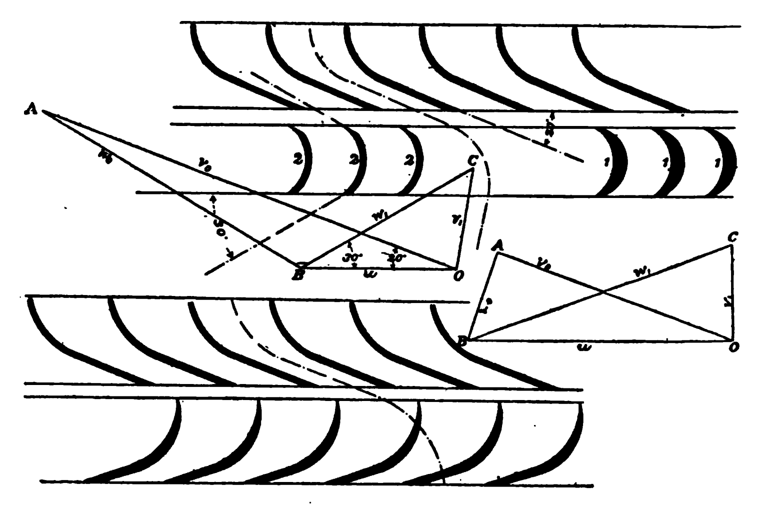


Fig. 137. — Tracé schématique des aubes directrices fixes et des aubes mobiles des turbines à impulsion (moitié supérieure de la figure), et à réaction (moitié inférieure); dans chaque tracé, le distributeur fixe est au-dessus de la partie mobile.

Triangles des vitesses correspondants, à l'entrée et à la sortie (d'après M. Rateau) :

AO (v_0), vitesse absolue de la vapeur à la sortie du distributeur; — BO (u), vitesse linéaire de la turbine; — AB (w_0) et CB (w_1), vitesses relatives de la vapeur par rapport à la turbine, à l'entrée et à la sortie; — CO (v_1), vitesse absolue de la vapeur à la sortie de la turbine.

éviter ce choc, on fait entrer le jet de vapeur à peu près tangentiellement aux aubes, puis il glisse sur leur surface courbe. Les conditions qui réalisent ce programme sont

complet, et tantôt seulement la partie tournante. Dans les descriptions qui suivent, la première acception seule sera employée, la partie tournante étant désignée par le nom de *couronne mobile* ou seulement de *couronne.*

simples : la vitesse du jet de vapeur sortant du distributeur étant représentée par le vecteur AO (fig. 137), et celle du point de la couronne où pénètre ce jet par BO, AB sera la vitesse *relative* du jet par rapport à la couronne, et le choc est évité si AB se présente tangentiellement à l'entrée de l'aube. A la sortie de la couronne, la vitesse relative est CB, tangente à l'extrémité de l'aube ; la vitesse linéaire de la couronne, BC, est la même qu'à l'entrée (dans les turbines *axiales*) ; le triangle BCO montre que la vitesse de sortie, CO, peut être suffisamment réduite.

L'admission est *totale* quand le distributeur envoie la vapeur sur la circonférence entière de la couronne ; elle est *partielle* dans le cas contraire ; parfois le distributeur n'a qu'un seul orifice.

La turbine est dite à *impulsion* (ou à *action*) quand la pression dans le jet de vapeur, à la sortie du distributeur, au moment où il pénètre dans la couronne, est tombée jusqu'à la valeur finale d'échappement ; la vitesse du jet correspond alors à la chute totale de pression depuis la chaudière jusqu'au condenseur. Dans la turbine à *réaction*, la pression du jet, qui sort du distributeur, n'a pas encore atteint sa valeur finale, et la vitesse du jet est moindre. L'abaissement de la pression jusqu'à la valeur finale se produit pendant la traversée de la couronne.

Suivant la direction générale du fluide, on distingue les turbines *axiales* (ou *hélicoïdes*), où le jet reste toujours à peu près à égale distance de l'axe de révolution de la couronne, et les turbines *radiales*, divisées en *centrifuges* et en *centripètes*, suivant que le jet s'éloigne ou se rapproche de l'axe de rotation. Dans le type *mixte*, l'entrée dans la couronne est centripète et la sortie axiale.

De même que les moteurs à piston sont monocylindriques ou à multiple expansion, une couronne unique peut recueillir toute l'action motrice de la vapeur, ou bien on subdivise la chute totale de pression en ménageant une série d'enceintes où s'établissent des pressions décroissantes, avec

une couronne mobile entre chaque enceinte et la suivante : la vitesse du jet qui actionne chaque couronne se trouve ainsi réduite. On installe ainsi des groupes de plus de 50 couronnes successives. Par suite de l'abaissement continu de la pression de la vapeur, le débit en volume va en augmentant d'une couronne à la suivante.

Le principe général des turbines à vapeur et à eau est le même, mais l'emploi de la vapeur entraîne de grandes difficultés d'exécution, à cause de l'énorme vitesse du jet fluide. Dans la turbine à impulsion avec couronne unique, cette vitesse, à la sortie du distributeur, dépasse 1 000 m par seconde (pour des pressions initiales absolues de 8 et 12 kg par cm², avec une pression finale de 0,1 kg par cm², les vitesses sont respectivement de 1 140 et 1 200 m par seconde). La vitesse linéaire de la couronne doit être environ le tiers de celle de la vapeur[1] : il en résulte d'énormes vitesses angulaires, parfois de 10 000 et 15 000 tours par minute : la couronne est soumise à de grands efforts intérieurs, qui exigent l'emploi d'un métal très résistant et des procédés spéciaux de construction. L'attache des aubes doit être particulièrement soignée : parfois elles sont découpées dans la masse même de la couronne métallique. Le moindre balourd de la partie tournante aurait des conséquences désastreuses : l'arbre long et flexible de la turbine de Laval, qui se place de lui-même dans la position la plus favorable, remédie à l'effet du petit balourd inévitable, ne fût-ce que par inégalités de densité du métal, on par suite de la rupture d'une aube.

Avec l'admission partielle, on peut diminuer la vitesse angulaire, ou le nombre de tours par minute, pour une même vitesse linéaire, en augmentant le rayon de la couronne; mais la tension intérieure de la jante reste la même, l'effort que supporte le métal par mm² étant proportionnel au carré de la vitesse linéaire; en outre, l'augmentation du rayon

[1] Dans les turbines à réaction, la vitesse du jet de vapeur est moindre; néanmoins la vitesse de la couronne est plus grande, comme le montre la figure 137.

accroît la perte de travail par frottement de la couronne contre la vapeur d'échappement, qui remplit l'enceinte dans laquelle elle tourne.

On a soin d'ailleurs de se tenir plutôt en dessous de la vitesse théorique de marche la plus favorable, ce qui ne réduit pas beaucoup le rendement.

En outre, l'emploi des couronnes multiples a permis de diminuer notablement le nombre de tours par minute, en réduisant la vitesse des jets de vapeur qui les actionne. On est descendu à quelques centaines de tours par minute dans certains appareils. Les engrenages réducteurs de vitesse, nécessaires avec les turbines à très grande vitesse, ont pu être supprimés.

Néanmoins, dans bien des cas, les vitesses sont encore telles qu'une augmentation notable en serait dangereuse : il est donc important que la turbine ne puisse pas s'emballer, quand la résistance qu'elle surmonte vient à disparaître ; des régulateurs doivent être convenablement disposés à cet effet. Le régulateur est d'ailleurs utile dans beaucoup d'applications pour maintenir suffisamment uniforme la vitesse de marche : il agit par manœuvre d'un obturateur qui lamine plus ou moins la vapeur admise, ou même l'arrête complètement; l'action du régulateur se fait très rapidement sentir, car la vapeur traverse en fort peu de temps l'appareil, même composé de nombreuses couronnes successives.

La condensation est très importante pour la marche économique des turbines, car elles utilisent bien mieux les très faibles pressions de vapeur que les moteurs à piston. Elles peuvent fonctionner avantageusement avec de faibles pressions initiales, par exemple avec la vapeur d'échappement, à la pression atmosphérique, d'un moteur à piston. Dans certains cas, au lieu d'appliquer directement la condensation à un moteur à piston, il peut être avantageux de la faire suivre d'une turbine fonctionnant entre la pression atmosphérique et celle du condenseur.

Cette combinaison présente une certaine analogie avec

celle des moteurs à vapeurs combinées : la turbine remplace la machine à liquide volatil.

Les principales causes de perte de rendement de la turbine sont les frottements et chocs du jet de vapeur dans les distributeurs et les couronnes, la force vive du jet qui quitte les couronnes avec une vitesse réduite, mais non pas nulle, le frottement des couronnes dans la vapeur d'échappement, enfin les fuites de vapeur, qui ont une importance assez grande. Lorsque la turbine est à réaction, il se produit une perte spéciale de vapeur par la *fuite au joint :* comme la pression dans la veine qui sort du distributeur, pour entrer dans la couronne, est plus élevée que la pression finale qui règne dans l'enceinte où tourne la couronne, une nappe de vapeur s'échappe par le vide ou *joint* qui existe nécessairement entre la partie fixe et la partie tournante. Cette fuite au joint ne se produit pas dans le fonctionnement à impulsion.

En outre, les turbines multiples ont leurs couronnes montées sur un axe commun : entre deux couronnes successives existe une enceinte fixe, qui reçoit la vapeur de la couronne d'amont pour la distribuer sur la couronne d'aval. Or on n'arrive pas à rendre étanches ces enceintes. Le montage des couronnes peut être fait sur un tambour (fig. 138, partie gauche), comme dans la turbine Parsons : en *a*, *a*... sont les couronnes fixées au tambour, et en *b*, *b*... les distributeurs qui les séparent, attachés à l'enveloppe extérieure fixe : une fuite, indiquée par des flèches, se produit entre ces distributeurs et le tambour. Dans le montage *multicellulaire* des turbines Rateau (partie droite de la figure), les différentes couronnes sont des disques montés sur un arbre de faible diamètre, et les distributeurs, fixés à l'enveloppe extérieure, sont munis de cloisons qui s'étendent jusqu'à l'arbre : la fuite, entre ces distributeurs et l'arbre, se fait en *c*, *c*... par une fente circulaire de bien plus petit diamètre que dans le cas précédent. Par contre, l'augmentation de surface des couronnes relève un peu la perte par frottement

dans la vapeur, mais, d'après M. Rateau, cette perte ne dépasse pas 2 à 4 p. 100 de la puissance normale sur des types de 500 chevaux.

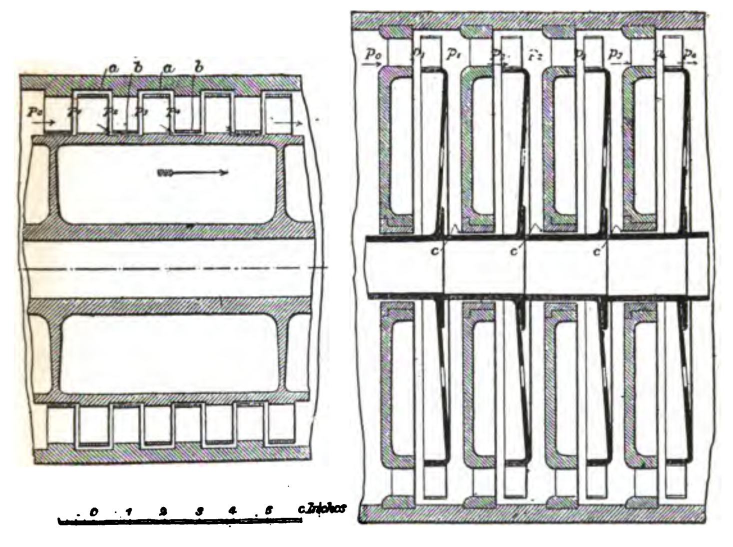


Fig. 138. — Turbine multiple à tambour (à gauche) et multicellulaire (à droite) (d'après M. Rateau).

La théorie montre que le travail que pourrait donner un kg de vapeur, s'écoulant de la chaudière au condenseur en traversant une turbine parfaite, est précisément le même que pour la machine à piston idéale fonctionnant entre les mêmes pressions extrêmes, suivant le cycle théorique (§ 28) ; aucun des deux systèmes n'a donc d'avantage théorique intrinsèque sur l'autre. On peut mesurer le travail effectif que donne une turbine, à l'aide d'un frein dynamométrique, ou plus simplement le travail utile produit par un groupe électrogène ou par une turbine-pompe ; mais on ne peut guère mesurer dans la turbine l'équivalent du travail indiqué du moteur à piston.

Certaines turbines, de grande puissance, arrivent à être

à peu près comparables, sous le rapport de la dépense de vapeur, aux meilleurs moteurs à pistons.

L'action de la vapeur dans une turbine produit une poussée suivant l'axe, qui doit être équilibrée par une butée convenable ou par un piston sur lequel s'exerce la pression de la vapeur. Si l'appareil commandé directement par la turbine exerce aussi une poussée axiale, comme une pompe

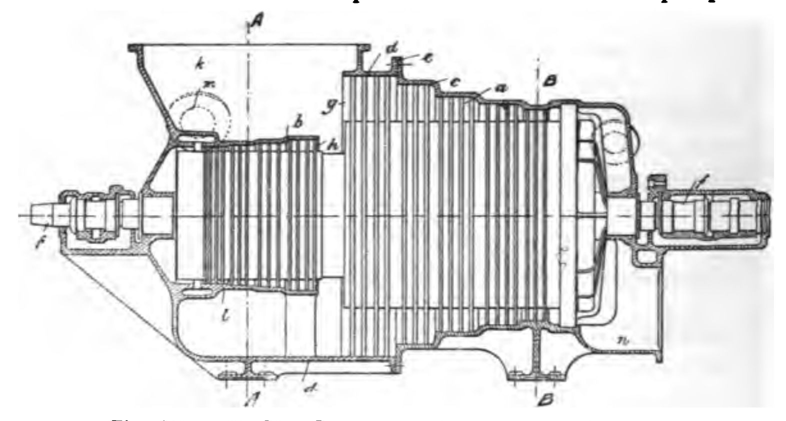


Fig. 139. — Turbine Parsons marine, avec marche arrière.
a, turbine de marche normale avec admission de vapeur en *n* et échappement en *k* ; *b*, turbine arrière, avec admission en *m* et échappement en *k*.

centrifuge, ou une hélice de navire, on oppose les deux poussées l'une à l'autre, de sorte que leur différence seule reste à équilibrer.

Pour l'application de la turbine à la commande de l'hélice des navires, le changement de marche est nécessaire. On l'obtient en montant sur un arbre unique deux groupes de turbines, disposées pour tourner en sens inverse : la vapeur est admise dans un des groupes seulement, l'autre tournant à vide dans la vapeur d'échappement. La marche arrière est d'ailleurs produite par une turbine moins importante que la marche avant (fig. 139). Pour gagner de la place, on monte la turbine de marche arrière à l'intérieur de la turbine principale (fig. 140).

La turbine de Laval (fig. 141 à 143) a une couronne unique, qui reçoit la vapeur d'un ou de plusieurs ajutages. Elle fonctionne à impulsion. La vitesse de rotation, très grande, est réduite au dixième par des engrenages de construction remarquable. La figure 143 montre que l'ajutage est divergent, ce qui, à première vue, semble devoir diminuer la

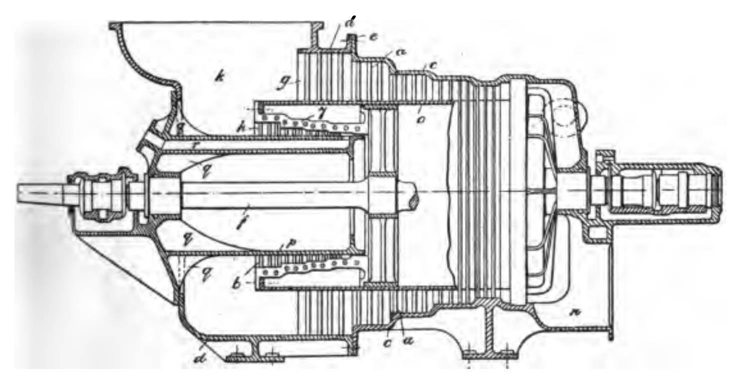


Fig. 140. — Turbine Parsons marine, télescopique : la turbine de marche arrière est à l'intérieur du tambour de la turbine principale, et reçoit la vapeur par le tuyau *r*. Les parties *a* et *p* sont fixes ; le tambour *o* fait tourner l'arbre et porte les couronnes à l'extérieur et à l'intérieur.

vitesse du jet de vapeur, en augmentant la section transversale. En réalité, avec des proportions convenables, l'évasement permet au jet de vapeur de prendre toute sa vitesse. Il faut, en effet, que la pression dans le jet de vapeur tombe jusqu'à être égale à celle qui règne dans le condenseur, mais cette chute de pression de la vapeur est accompagnée d'une grande augmentation de volume ; on doit donc offrir au fluide détendu une section de passage assez grande.

La turbine Parsons (fig. 144) se compose d'un grand nombre de couronnes successives formant plusieurs groupes de diamètres croissants. L'attache des distributeurs fixes à l'enveloppe extérieure et des aubes mobiles à un tam-

bour que porte l'arbre se voit figure 138. Des pistons équilibrent la poussée produite par la vapeur. Grâce au grand

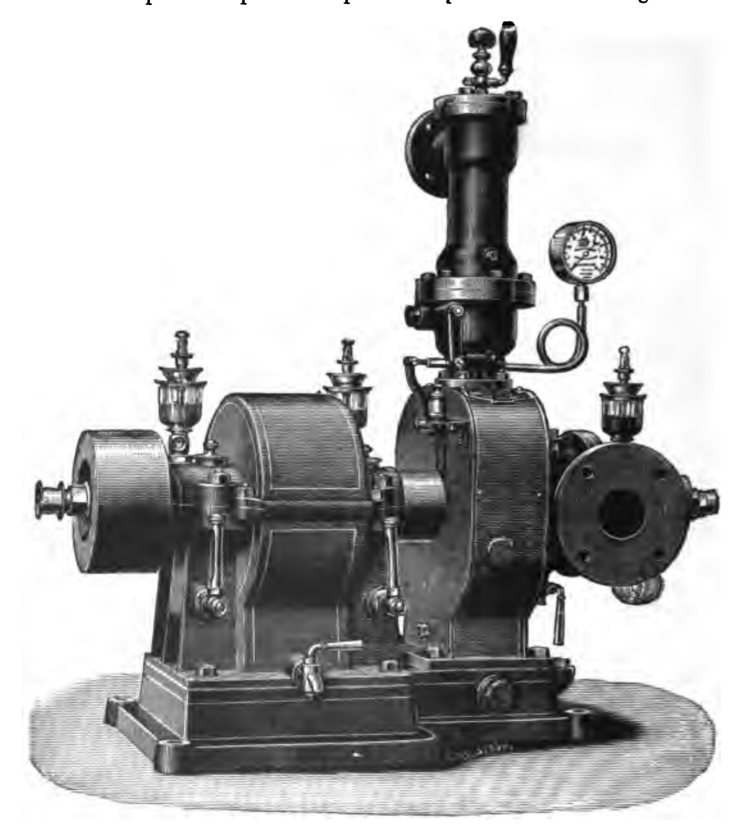


Fig. 141. — Turbine de Laval; ensemble. A droite, enveloppe de la couronne mobile; à gauche, enveloppe de l'engrenage; sur l'extrémité gauche de l'arbre, poulie motrice.

nombre des couronnes, la vitesse de la vapeur ne dépasse guère en aucun point 300 à 350 m par seconde. Le fonctionnement est à réaction. Certaines turbines Parsons ont une puissance de 5 000 chevaux.

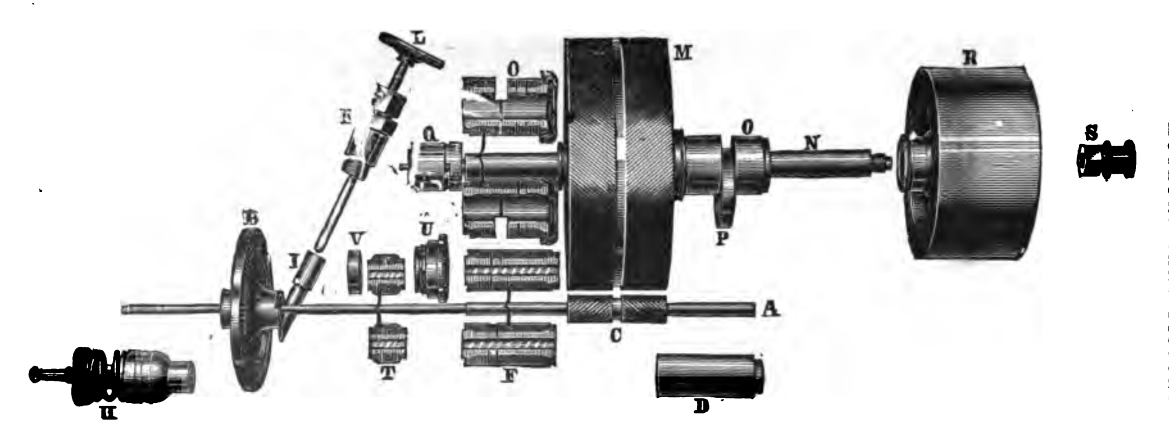


Fig. 142. — Principaux organes de la turbine à vapeur de Laval.

A, arbre de la turbine; — B, couronne tournante; — C, pignon; — D, coussinet du bout d'arbre; — F, O, coussinets en deux pièces; — H, coussinet à rotule; — I, ajutage; — K, L, obturateur de l'ajutage; — M, roue dentée; — N, arbre moteur; — P, anneau graisseur; — Q, régulateur; — R, poulie; — S, contre-écrou; — T, garniture étanche de l'arbre.

Pour la propulsion des navires, on fait usage de trois

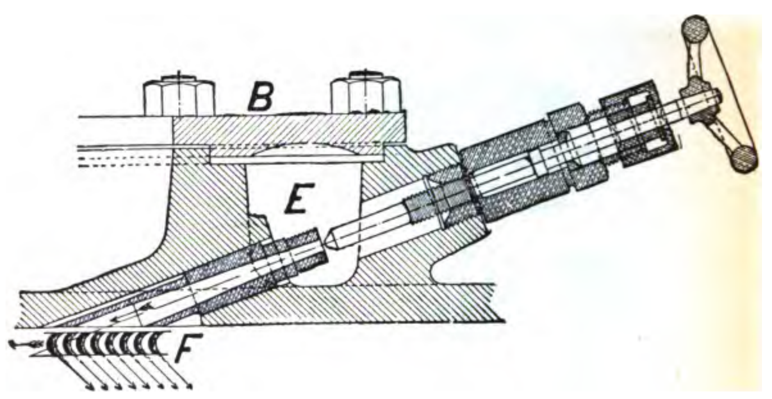


Fig. 143. — Coupe de l'ajutage distributeur de la turbine de Laval.
E, boîte à vapeur; — F, portion de la couronne tournante.

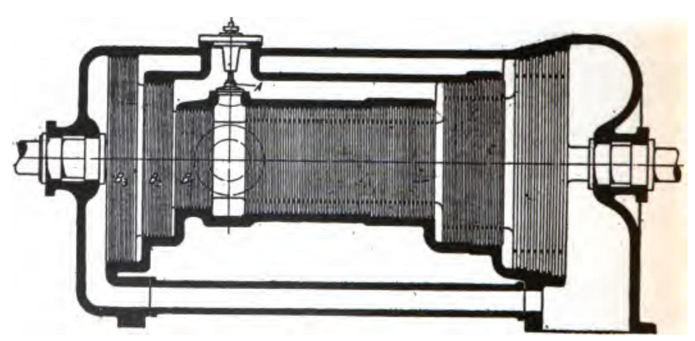


Fig. 144. — Turbine Parsons; coupe longitudinale. Les distributeurs adhèrent aux enveloppes fixes; les couronnes mobiles sont portées par les tambours montés sur l'arbre. Ces couronnes forment plusieurs séries successives de diamètres croissants. La vapeur est admise par la tubulure horizontale dessinée en pointillé; en A est une admission supplémentaire occasionnelle au second groupe de couronnes. L'échappement au condenseur se fait à droite. B_1, B_2, B_3, sont des pistons d'équilibre de la poussée suivant l'axe due aux couronnes (d'après M. Stodola, dans la *Revue de mécanique*, fév. 1904).

arbres d'hélice; la turbine de l'arbre central reçoit la

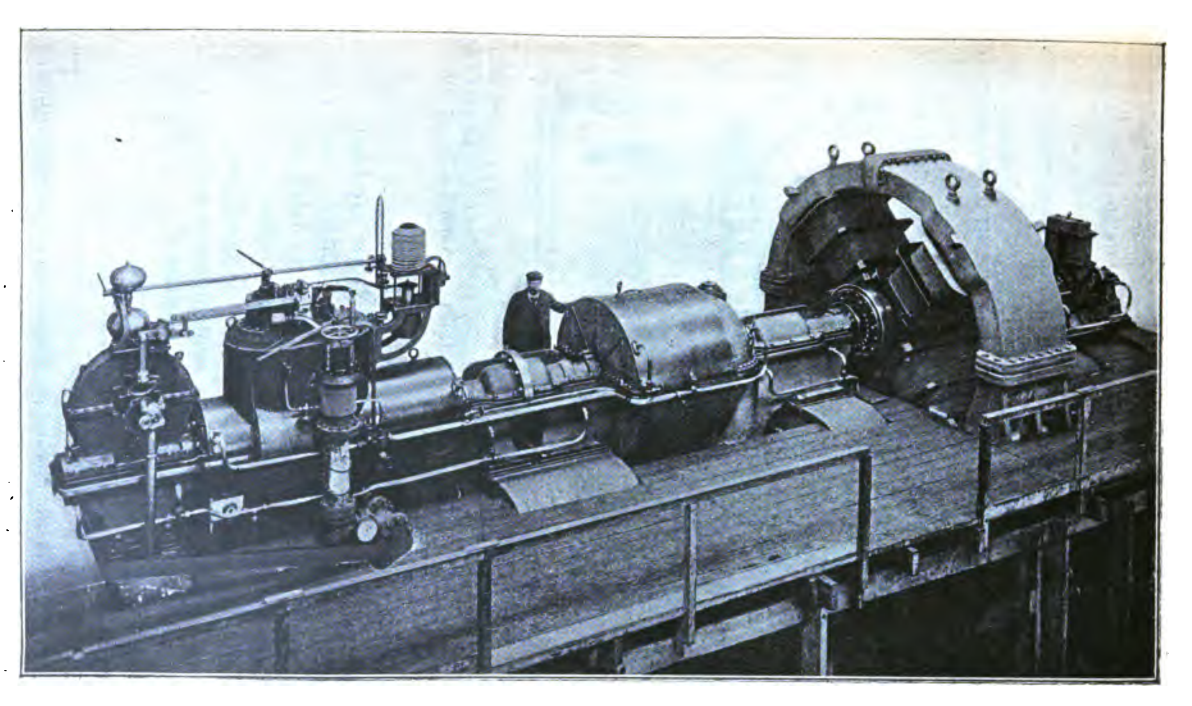


Fig. 145. — Turbine Parsons avec alternateur de 1 000 kilowatts, pour la ville d'Elberfeld ; montage provisoire chez le constructeur à Newcastle.

vapeur de la chaudière, puis l'envoie aux turbines des deux arbres latéraux, d'où elle s'échappe au condenseur.

La figure 145 représente un groupe électrogène formé d'une turbine Parsons et d'un alternateur.

La turbine Rateau (fig. 146) fonctionne à impulsion. La figure 138 montre la disposition *multicellulaire* de ces turbines, adoptée pour réduire les fuites. L'admission est partielle

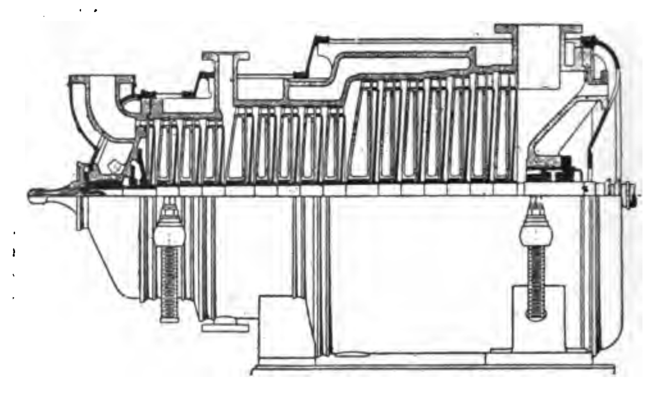


Fig. 146. — Turbine Rateau; la vapeur circule de gauche à droite. Les distributeurs fixes sont montés dans des cloisons qui s'étendent jusqu'à l'arbre de l'appareil; les couronnes mobiles tournent entre ces cloisons.

sur les premières couronnes et totale sur les dernières, qui ont d'ailleurs un plus grand diamètre : cette disposition est justifiée par l'augmentation du débit en volume de la vapeur, à mesure que la pression diminue.

La turbine à vapeur se prête à la commande directe de ventilateurs et de pompes centrifuges, à rotation rapide, donnant par suite de fortes pressions d'air et de grandes hauteurs de refoulement. On peut d'ailleurs multiplier ces pressions et ces hauteurs, en installant plusieurs ventilateurs ou plusieurs pompes en succession sur un arbre unique, dans une enveloppe commune. Ces dispositions sont de nature à étendre beaucoup les applications de ces appa-

reils, qui ont le mérite d'être petits pour une grande puissance.

69. Injecteurs. — L'injecteur, qui sert à l'alimentation des chaudières, est une machine élévatoire où l'eau est directement entraînée par la vapeur. La figure 147 montre à quelle simplicité il peut être réduit : la vapeur motrice s'écoule par la *tuyère n*, quand on ouvre un robinet de prise ;

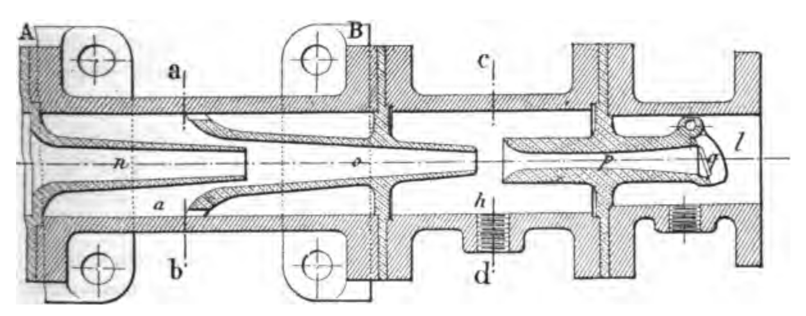


Fig. 147. — Ancien injecteur de locomotives des chemins de fer du Nord.

n, *tuyère* à vapeur; — arrivée de l'eau (non visible sur cette coupe) dans le plan *ab*; — *o*, *mélangeur* (chambre, cheminée); — *trop-plein* dans le plan *cd*; — *p*, *divergent*, avec claquet *q*.

l'eau pénètre autour de cette tuyère, et se trouve entraînée dans le *mélangeur o*, où la vapeur se condense, en partie du moins. Le jet rapide lancé par le mélangeur pénètre dans l'embouchure du *divergent p*, à embouchure évasée, dont la section va ensuite en augmentant. Entre le mélangeur et le divergent, le jet fluide traverse un espace dit *trop-plein*, en libre communication avec l'atmosphère, par une ouverture dans l'enveloppe de l'appareil (non visible sur la figure). Ce trop-plein est nécessaire pour le dégagement de la vapeur et de l'eau au moment de la mise en marche ; sans cette ouverture, l'*amorçage* ne se produirait pas. Le jet sortant du mélangeur se trouve donc soumis à la pression de l'atmosphère. L'évasement du divergent en

diminue la vitesse, par suite de l'augmentation de la section transversale ; en même temps, d'après une loi du mouvement des fluides, la pression augmente, de sorte qu'elle dépasse celle de la chaudière qu'on veut alimenter et y pénètre, en soulevant le clapet *q*, qui empêche la vidange lors de l'arrêt de l'injecteur.

En lançant, à l'aide d'une pompe ordinaire, un jet d'eau froide suffisamment rapide dans l'embouchure du divergent, on pourrait faire pénétrer de même cette eau dans une chaudière à haute pression.

L'injecteur Giffard (fig. 148) est muni d'une *aiguille* centrale, réglable à la main, de manière à ouvrir plus ou moins le passage de la vapeur. En outre, la tuyère elle-même, avec l'aiguille, peut être déplacée de manière à faire varier, entre son extrémité et la paroi du mélangeur (dit aussi *chambre* et *cheminée*), la section de passage de l'eau. Cet injecteur est de la catégorie des appareils *aspirants*, qui peuvent prendre l'eau dans une bâche inférieure, tandis que d'autres ne fonctionnent que s'ils la reçoivent *en charge*. Pour l'amorçage, on ouvre légèrement la tuyère à l'aide de l'aiguille, et le jet de vapeur commence par aspirer l'air, ce qui produit l'élévation de l'eau.

La dimension caractéristique d'un injecteur est le diamètre du divergent à sa partie la plus étroite, d'où dépend le débit.

Les qualités principales des injecteurs, dont il existe des types nombreux, sont les suivantes :

Facilité de la manœuvre et sûreté de l'amorçage ;

Fonctionnement avec de l'eau tiède : certains injecteurs prennent encore de l'eau réchauffée à 50°, mais cette température ne peut guère être dépassée ;

Débit variable à volonté ;

Fonctionnement sous des pressions diverses ; toutefois, autant que possible, l'injecteur doit être établi pour la pression normale d'emploi ;

Simplicité de la construction et facilité de l'entretien.

Un détail intéressant est l'évasement de la tuyère à vapeur de certains injecteurs (fig. 149), dont la raison a été

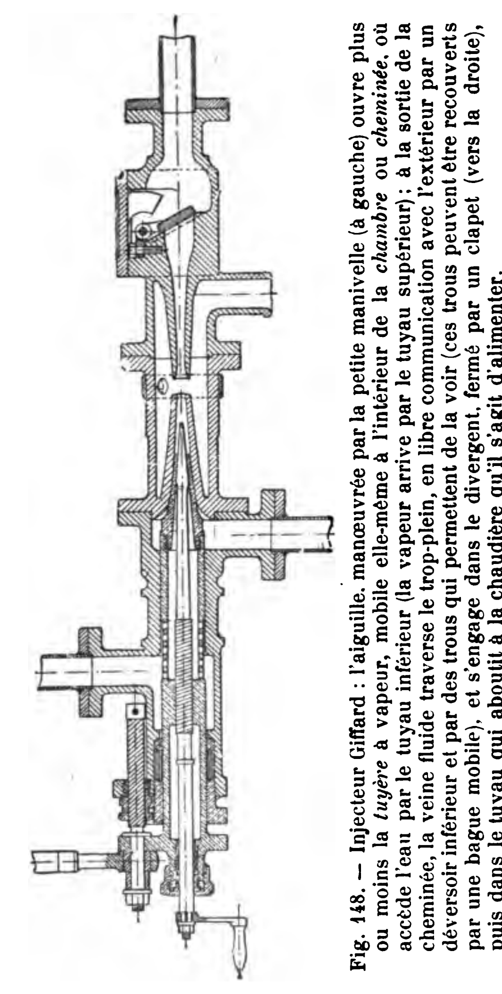


Fig. 148. — Injecteur Giffard : l'aiguille. manœuvrée par la petite manivelle (à gauche) ouvre plus ou moins la *tuyère* à vapeur, mobile elle-même à l'intérieur de la *chambre* ou *cheminée*, où accède l'eau par le tuyau inférieur (la vapeur arrive par le tuyau supérieur) ; à la sortie de la cheminée, la veine fluide traverse le trop-plein, en libre communication avec l'extérieur par un déversoir inférieur et par des trous qui permettent de la voir (ces trous peuvent être recouverts par une bague mobile), et s'engage dans le divergent, fermé par un clapet (vers la droite), puis dans le tuyau qui aboutit à la chaudière qu'il s'agit d'alimenter.

indiquée au paragraphe précédent. L'écoulement se fait ici à peu près sous la pression atmosphérique.

Le débit de chaque injecteur est variable entre certaines limites, qui dépendent de la pression de la vapeur et de la

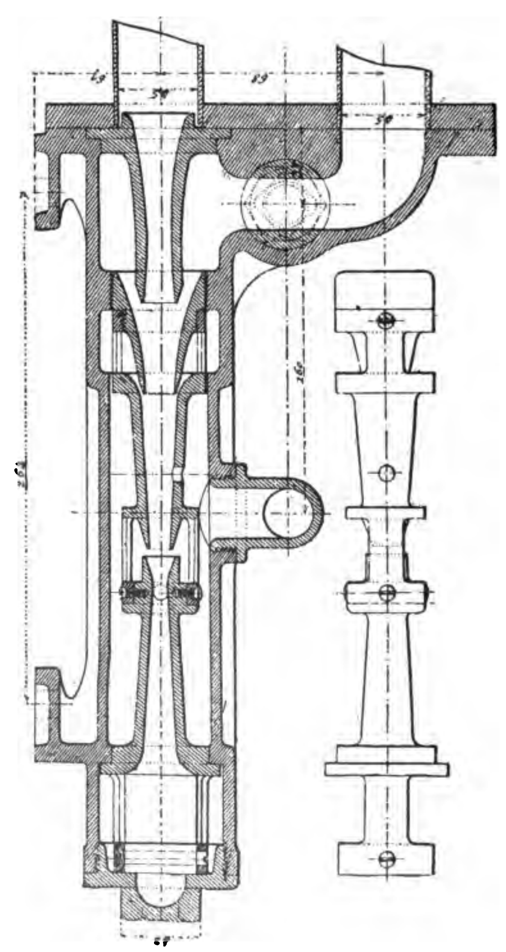


Fig. 149. — Injecteur Friedmann ; coupe horizontale et vue des cônes intérieurs. La vapeur s'échappe par la tuyère convergente et divergente, à droite ; l'eau arrive, en charge, par dessous. Le mélangeur est formé de deux cônes successifs. Le trop plein communiquant avec l'extérieur est placé vers le milieu de l'injecteur ; vient ensuite, à gauche, le divergent. L'eau s'échappe verticalement au-dessus de l'appareil en soulevant une soupape de retenue. En dévissant le bouchon fileté, à gauche de la figure, on peut sortir les cônes intérieurs dessinés à part.

température de l'eau d'alimentation. Sous une pression effective de 10 kg par cm², l'eau étant froide, certains injec-

teurs, à divergent de 9 mm, atteignent des débits de 175 litres par minute.

L'ouverture de trop-plein donne lieu à une aspiration de l'air, qui est refoulé dans la chaudière. Cet air nuit au fonctionnement des machines à condensation; c'est en outre une cause d'altération des tôles de chaudières. On évite cette aspiration en munissant le trop-plein d'une soupape automatique, qui ne s'oppose pas au dégagement extérieur de l'eau et de la vapeur, mais empêche la rentrée d'air en sens inverse.

L'injecteur ne perd par refroidissement extérieur qu'une très petite quantité de chaleur, quand le trop-plein ne laisse dégager ni eau ni vapeur : presque toute la chaleur de la vapeur qu'il reçoit échauffe l'eau d'alimention, parfois à plus de 100°, et la refoule. Il ne faut pas en conclure que l'injecteur est une machine thermique ayant un *rendement* extraordinaire : en réalité, l'injecteur dépense beaucoup de vapeur, mais sans la perdre parce qu'elle sert à échauffer l'eau d'alimentation. De même une machine élévatoire quelconque qui refoulerait son eau de condensation ne perdrait pas de chaleur.

Pour l'alimentation des chaudières ordinaires, non munies de réchauffeurs, ce chauffage préalable de l'eau au moyen de la vapeur n'a pas d'inconvénient, puisqu'il faut toujours fournir à l'eau les calories nécessaires, soit après, soit avant l'entrée dans la chaudière; il y a même avantage, pour la conservation et la bonne marche des générateurs, à ce que l'eau y pénètre chaude. Mais avec un réchauffeur qui épuise toute la chaleur des gaz de la combustion, et qui échauffe l'eau à l'aide d'un *sous-produit* des foyers, autrement perdu, l'injecteur cesse d'être économique. Comme simple machine élévatoire, il serait détestable.

La pression de la vapeur, qui met en action un injecteur, peut être inférieure à la pression dans le générateur alimenté. Il suffit qu'elle produise avec l'eau d'alimentation une veine fluide animée d'une vitesse convenable. Si deux chaudières voisines fonctionnaient à des pressions diffé-

rentes, la vapeur pourrait être prise, pour l'alimentation, sous la pression la plus faible.

Cette circonstance se présente rarement ; mais le principe est appliqué dans l'*injecteur à vapeur d'échappement*. La vapeur, qui s'échappe d'une machine sans condensation, s'écoule avec une vitesse suffisante pour donner avec l'eau une gerbe qui peut pénétrer dans une chaudière dont la pression n'est pas trop élevée.

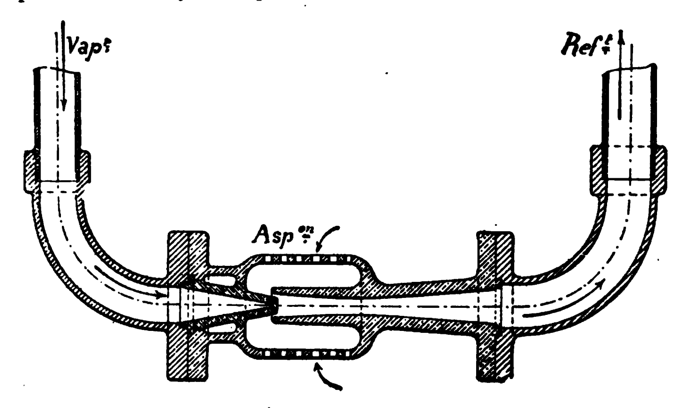


Fig. 150. — Éjecteur; coupe longitudinale.

Une portion de la vapeur, rejetée par la machine, produit ainsi le travail de refoulement de l'eau dans la chaudière et l'échauffe.

Les injecteurs à vapeur d'échappement peuvent alimenter les chaudières à pression modérée, 5 à 6 kg par cm². Pour les pressions plus élevées, on les complète par l'addition d'une tuyère supplémentaire recevant la vapeur de la chaudière. Ces appareils se sont peu répandus, parce que l'emploi de l'injecteur à vapeur d'échappement seule est assez limité, et parce que l'envoi dans les chaudières des matières grasses, entraînées hors des cylindres par la vapeur, est une cause d'altération des chaudières, et présente même un certain danger.

70. Éjecteurs. — L'éjecteur a une certaine analogie avec l'injecteur : il est disposé pour de grands débits avec de faibles hauteurs d'élévation. Le jet de vapeur (fig. 150) entraîne l'eau à élever et la lance dans un divergent, d'où part le tuyau de refoulement. L'échauffement assez fort de l'eau augmente beaucoup la dépense de vapeur. L'éjecteur n'est guère employé que comme appareil de secours, à cause de la grande facilité de la mise en marche.

D'autres *éjecteurs* servent à l'aspiration de l'air par la vapeur ; les *souffleurs* et les *échappements* de locomotives sont analogues en principe.

CHAPITRE VIII

PRINCIPAUX ORGANES DES MACHINES

71. Bâtis et fondations. — De même que les principales pièces mobiles des machines, les bâtis sont soumis à de grands efforts, et leur rôle dans la transmission des forces est tout aussi important. Le piston avec sa tige, la bielle, l'arbre avec la manivelle, d'une part, le palier, le bâti, et le cylindre, d'autre part, forment un ensemble qui reçoit l'action de forces développées par la pression de la vapeur sur le piston et sur le fond du cylindre. La déformation élastique du bâti, sous l'action de ces forces, doit être très faible ; les attaches des diverses parties fixes doivent être assez solides pour les maintenir sans aucun déplacement.

Certaines fondations portent seulement le poids de la machine, et empêchent qu'elle ne vibre et ne se déplace petit à petit. D'autres fois, la fondation joue aussi un rôle essentiel dans l'ensemble, en transmettant une partie des forces intérieures, qui s'y développent. Ainsi, dans la machine à balancier, le cylindre, le support du balancier et le palier de l'arbre ne sont reliés que par la fondation ; il est vrai que les efforts exercés par ces trois pièces ne s'écartent pas beaucoup de la verticale. De même, dans les machines horizontales, avec manivelle en porte-à-faux, le palier le plus éloigné de la manivelle n'est généralement rattaché au reste du bâti que par la fondation : la fosse, où se loge la partie inférieure du volant, empêche toute liaison plus directe. Au contraire, le bâti est directement rattaché aux deux paliers quand la bielle motrice s'articule sur un coude au milieu de l'arbre.

Certaines machines horizontales comportent une plaque

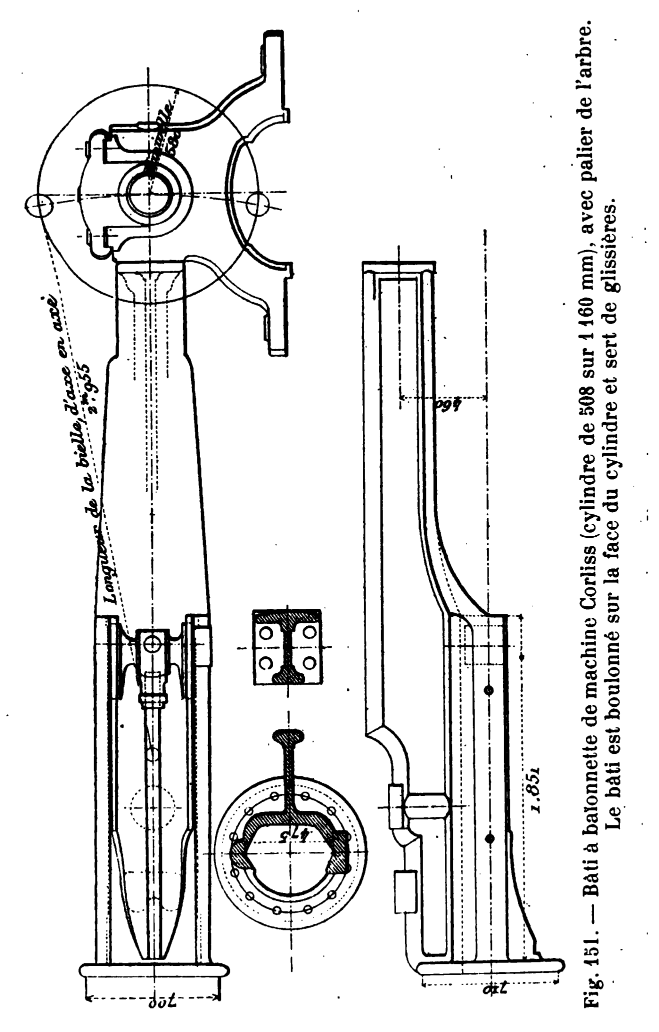


Fig. 151. — Bâti à baïonnette de machine Corliss (cylindre de 508 sur 1 160 mm), avec palier de l'arbre. Le bâti est boulonné sur la face du cylindre et sert de glissières.

de fondation ou bâti plat, sur laquelle se boulonnent le cylindre et le palier; cette disposition était fréquente dans

les anciennes constructions. Mais, depuis bien des années, on voit plus souvent le bâti Corliss ou à baïonnette (fig. 151), qui rattache directement le cylindre au palier. Ce bâti n'est pas exactement opposé à l'effort transmis par la bielle motrice : il en résulte une tendance au déplacement transversal du cylindre, avec flexion du bâti. La rigidité même du bâti et les boulons qui fixent le cylindre et le palier sur la fondation s'opposent à ce mouvement. Le palier peut être fondu avec le bâti à baïonnette.

Dans de grandes machines horizontales de construction récente, on a ajouté une base plate à ce bâti, en combinant les deux systèmes.

Lorsqu'on met en marche une machine, la vapeur échauffe un peu le bâti, qui se dilate : la dilatation tend à éloigner le cylindre et le palier; on a quelquefois monté le cylindre sur une glissière longitudinale, qui en permet le déplacement : souvent on se contente de donner un peu de jeu dans leurs trous aux boulons de fixation du cylindre.

Dans les machines-pilon, le bâti n'est fixé qu'à sa partie inférieure; la dilatation de la partie supérieure et du cylindre est libre. Mais il ne faut pas d'assemblage trop rigide entre les divers groupes d'un grand appareil à plusieurs cylindres; l'arbre et ses supports ne se dilatent pas comme la partie supérieure de la machine, et, par suite des détentes successives, la température moyenne des divers cylindres n'est pas la même.

Les bâtis sont communément en fonte. Pour donner plus de légèreté aux machines-pilon, et en faciliter la visite, on remplace souvent, par de gros boulons ou des colonnettes en fer, les montants en fonte, sur une des faces de la machine (fig. 152), ou même sur les deux faces. On réduit aussi le poids des bâtis en les coulant en acier, notamment dans certaines machines marines.

La disposition de la figure 152 est d'ailleurs logique à divers points de vue. L'arbre tournant dans un sens, tout le reste de la machine tend à tourner en sens inverse, et le

bâti doit résister à un moment de rotation égal au moment moteur. Ce moment résulte de l'effort que la tête de pis-

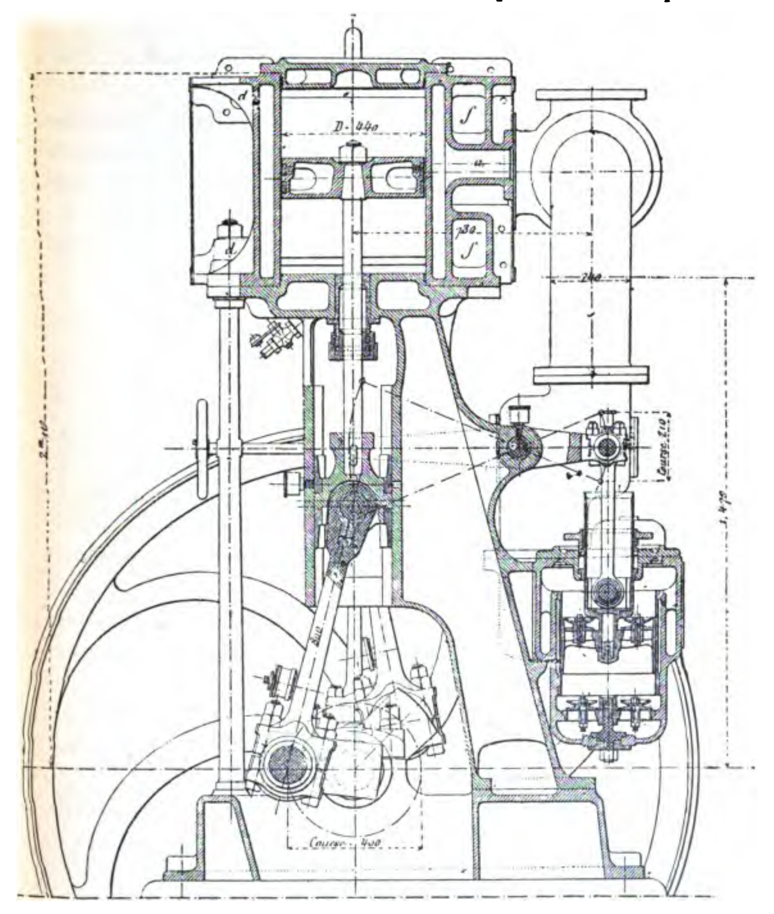


Fig. 152. — Machine pilon avec bâti à un jambage en fonte et colonnettes d'acier.

ton exerce sur la glissière. Par suite, un des côtés du bâti, coulé en fonte et portant les glissières, est plus

chargé que l'autre, pour lequel les tiges de fer suffisent.

Les fondations des machines fixes se composent de massifs en maçonnerie, construits avec des pierres de taille ou en béton. Les machines marines sont boulonnées sur les membrures du bâtiment.

Les fondations des machines fixes transmettent au sol des vibrations parfois gênantes : on peut les amortir en faisant reposer le bâti sur des plaques de caoutchouc. Ces plaques doivent être disposées de manière à porter 4 à 6 kg par cm^2 ; de plus les boulons de fixation doivent être entourés de caoutchouc, comme si on voulait réaliser un isolement contre le passage de l'électricité.

72. Cylindres. — Les cylindres sont fondus d'une seule pièce, même avec une enveloppe de vapeur (fig. 153), ou bien une chemise intérieure rapportée forme l'enveloppe (fig. 154). L'exécution du joint étanche aux deux bouts de la chemise a une grande importance. La table des tiroirs plans, ou la chemise du logement des tiroirs cylindriques, ou même la boîte à vapeur entière peuvent également être rapportées.

Sur les petits cylindres, des bossages, dans les barrettes qui séparent les lumières, permettent de fixer, à l'aide de vis, de nouvelles tables lors des réparations.

La base du cylindre qui regarde l'arbre peut être fondue avec le cylindre, ou bien rapportée comme le plateau opposé.

Les cylindres sont presque toujours en fonte; cependant on a quelquefois coulé de grands cylindres en acier, en y rapportant des chemises de fonte, et même d'acier.

Les plateaux des petits cylindres, en fonte, sont formés d'une toile raidie par des nervures. La double toile donne plus facilement une résistance suffisante pour les grands diamètres et permet l'enveloppe de vapeur.

Les cylindres sont munis de robinets purgeurs, quand l'échappement ne se fait pas à la partie inférieure, et par-

fois de soupapes de sûreté, pour éviter les ruptures résultant de *coups d'eau.*

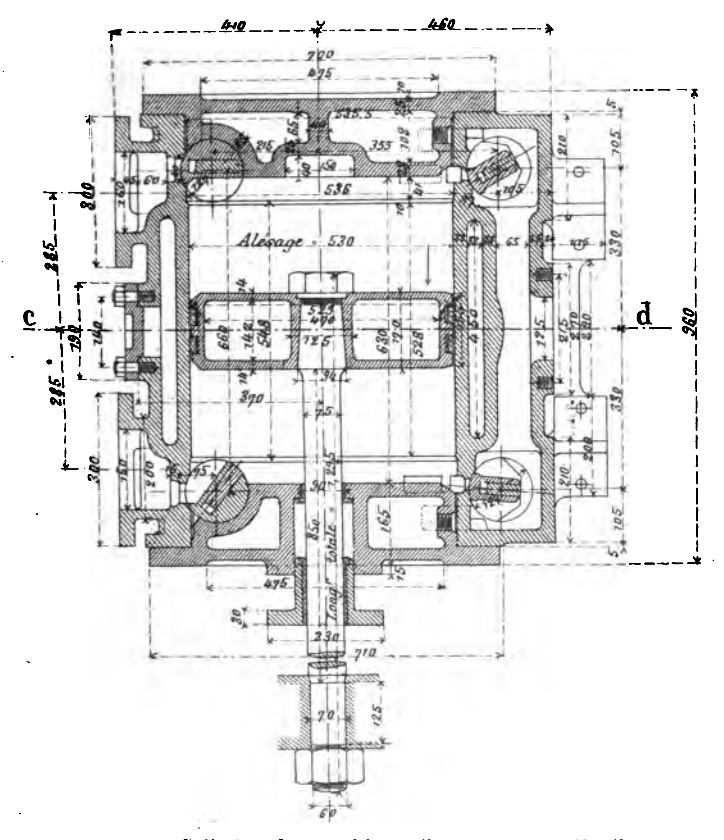


Fig. 153. — Cylindre de machine pilon à quatre distributeurs, fondu avec enveloppe de vapeur ; coupe verticale (constructeur, E. Garnier).

73. Pistons et garnitures — Le piston est soumis à la pression de la vapeur, que de fortes compressions peuvent exagérer. Les diagrammes relevés dans les cylindres du navire « City of Paris » indiquent des différences de pres-

sion qui atteignent respectivement 6 — 2,75 — 1,3 kg par cm² ; les diamètres étant 1,143 m — 1,803 m — 2,870 m, il

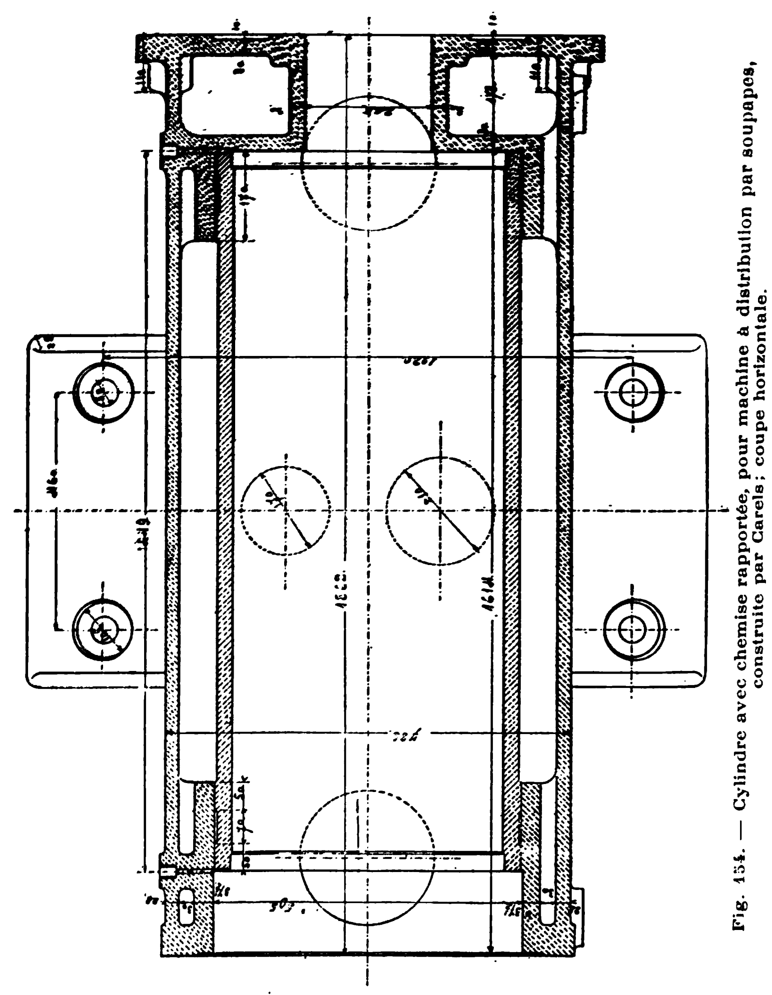


Fig. 154. — Cylindre avec chemise rapportée, pour machine à distribution par soupapes, construite par Carels ; coupe horizontale.

en résulte des efforts de 62, 70 et 85 t. Comme terme de comparaison, le poids de l'obélisque de Louqsor, à Paris, est

estimé à 225 t. La toile du piston est simple (fig. 155) ou double (fig. 156). La *hauteur* ou l'*épaisseur* du piston dépend surtout de la place nécessaire pour les bagues de la garniture; elle entraine une égale augmentation de la longueur du cylindre.

Il est bon d'allégir le piston, pour réduire les effets de l'inertie, les vibrations qui en résultent, et l'usure des cylindres horizontaux.

La forme creuse, souvent raidie par des nervures intérieures, permet de concilier la légèreté et la résistance. La forme conique, ou en *chapeau chinois* (fig. 155), est de même favorable au bon emploi de la matière ; dans les machines-pilon, elle réduit la hauteur du cylindre au-dessus de l'arbre.

Le piston est forgé en fer, ou coulé en fonte ou en acier.

Pour atténuer l'effet thermique des parois, il convient que la surface en contact avec la vapeur soit aussi faible que possible, comme sur le type à bases plates de la figure 156; la surface des fonds de cylindre, qui sont également plats, est réduite de même. En polissant toutes les surfaces, il est probable qu'on diminue les condensations.

On est tenté de croire que le piston creux sépare mieux la vapeur, admise d'un côté, de la vapeur d'échappement, qui se trouve de l'autre. Mais si l'on remarque que les variations de la température du métal, pendant une course aller et retour, ne se font sentir que jusqu'à une profondeur de quelques millimètres au plus, et que la masse du métal doit prendre la même température moyenne dans le piston creux et dans le piston plein, on voit que l'avantage du piston creux, sous ce rapport, est illusoire. Il n'existerait que si on y faisait circuler la vapeur, comme dans l'enveloppe, ce qui est possible, mais au prix de complications excessives.

L'emmanchement de la tige doit être très solide et garanti contre le desserrage en service, que les vibrations pourraient provoquer.

Le simple emmanchement conique de la figure 156, exé-

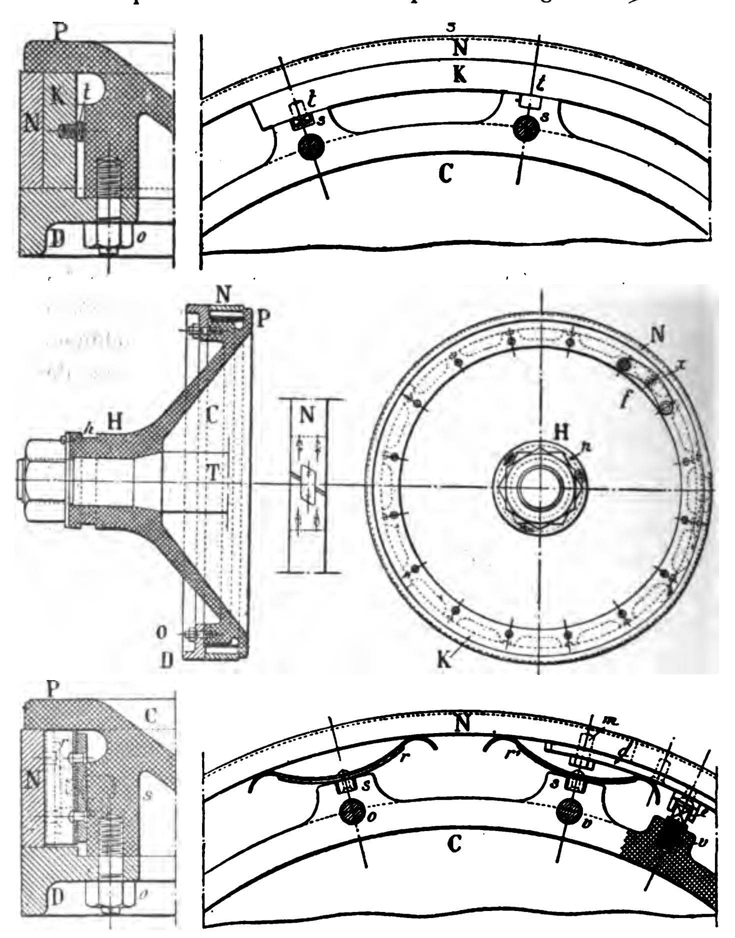


Fig. 155. — Piston en acier coulé, pour machine marine horizontale (d'après M. Demoulin). Le couvre-joint de la bague N est formé de la plaque *d*, fixée par les vis *m*; la fourche en acier *e* empêche la bague de tourner. La bague N est pressée contre le cylindre par les ressorts tels que *r*, *r'*; à la partie inférieure du piston, une cale en fonte K, maintenue par la tête des vis *t*, reporte sur la bague le poids du piston.

cuté à la presse hydraulique, ou en chauffant le piston pour le dilater, est simple et solide, au moins jusqu'au diamètre de 500 à 600 mm. Une petite rivure à froid complète le montage. Habituellement, l'assemblage est maintenu par un écrou, l'emmanchement de la tige étant conique ou cylindrique, avec une embase à l'opposé de l'écrou. Une clavette

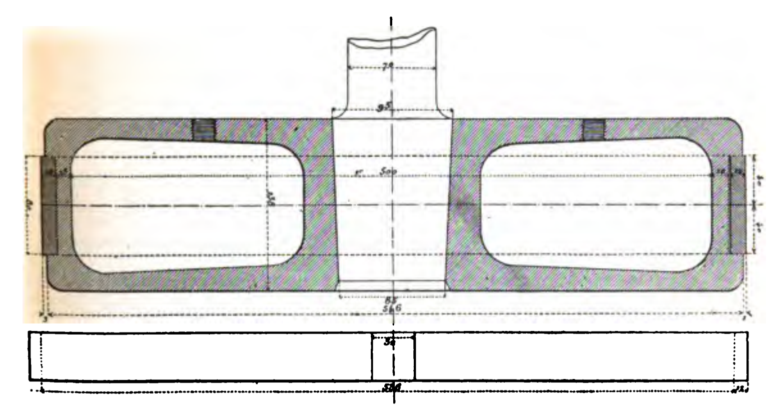


Fig. 156. — Piston creux en fer, avec bagues en fonte (locomotives du chemin de fer du Nord).

rivée, ou une bonne goupille, s'oppose au desserrage de l'écrou. Quelquefois la tige est forgée avec le piston.

Le joint étanche, entre le piston et le cylindre, s'obtient à l'aide de bagues élastiques ou *segments*, presque toujours en fonte, parfois garnis de métal antifriction. Pour les diamètres ne dépassant pas 700 ou 800 mm, l'élasticité de la bague fendue, puis resserrée et tournée extérieurement au diamètre du cylindre, suffit généralement pour l'appliquer contre les parois. Pour les grands diamètres, une série de ressorts assurent la portée des bagues. Le joint étanche doit exister non seulement au contact de la bague et du cylindre, mais aussi entre le plat de la bague et la gorge tournée sur le piston. La pression de la vapeur l'appuie contre cette gorge. On monte généralement deux bagues sur un piston.

Lorsque la bague bâille par l'usure, elle laisse un petit passage à la vapeur : la coupure en trait brisé (fig. 157) substituée à la coupure droite n'empêche pas complètement la fuite de vapeur, qui passe sous la bague : pour l'arrêter, on fait usage de pièces de joint (fig. 155). Il faut d'ailleurs

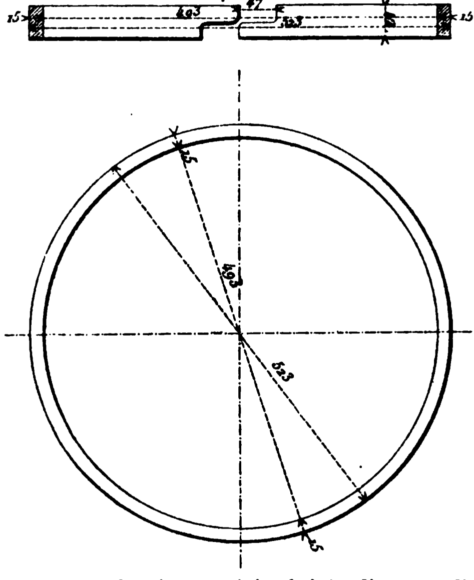


Fig. 157. — Bague de piston à joint brisé; diamètre d'alésage du cylindre, 508 mm. Le plan représente la bague tournée et alésée, avant la coupure, figurée sur la coupe; à la mise en place, les deux bouts coupés sont rapprochés.

laisser un peu de jeu entre les extrémités d'une bague neuve, afin qu'elle ne se coince pas dans le cylindre si elle s'échauffe par suite d'un frottement anormal.

Les bagues ne constituent pas seulement une garniture étanche, mais souvent, dans les machines horizontales, elles portent une partie du poids du piston; dans les machines verticales, surtout dans les machines marines, elles ont à résister aux déplacements transversaux.

Il est intéressant d'examiner comment le piston est supporté dans une machine horizontale. A l'extérieur, la tige est emmanchée dans la *tête* ou la *crosse de piston*, portée par les *glissières*. La tige sort du cylindre à travers une *garniture*, en traversant des bagues en bronze, qui sont généralement disposées de manière à la guider et à la supporter ; certaines garnitures, au contraire, assurent seulement un joint étanche, mais permettent un déplacement transversal de la tige. Le piston peut porter sur le fond du cylindre soit directement, soit en appuyant sur l'intérieur de la bague. La figure 155 montre une cale en fonte disposée pour cette portée. Dans certaines machines, une *contre-tige* sort du cylindre, du côté opposé à l'arbre, à travers une seconde garniture ; elle peut même s'emmancher dans un patin supporté par des glissières.

Dans ce dernier cas (et spécialement pour des pistons de machines soufflantes, plus grands que les pistons moteurs), on a quelquefois fait supporter tout le poids par les deux glissières extrêmes : le piston, monté au milieu de la tige, qui relie les deux patins, la fait fléchir ; les garnitures de tige permettent un déplacement transversal, et le piston ne doit pas poser sur ses bagues.

D'autres fois, on se sert des garnitures de la tige et de la contre-tige pour porter le poids du piston : comme la tête du piston sert aussi nécessairement de guide, cette disposition a l'inconvénient général du guidage en trois points, qui peuvent ne pas rester exactement en ligne droite par suite d'usures inégales.

Dans tous les cas il est bon de se rendre compte du rôle imposé aux garnitures des tiges ; si on leur fait porter le poids du piston, les bagues doivent avoir une largeur suffisante ; si elles servent seulement à empêcher les fuites, un petit jeu transversal est utile pour que les flexions et déplacements de la tige soient libres.

La garniture (fig. 158) comporte la *bague de fond* et le *presse-garniture*, serré sur des goujons, de manière à com-

primer la matière molle qui assure le joint; bague et presse-garniture sont en deux pièces, si la tige porte des saillies qui ne peuvent les traverser lors du montage. Les deux moitiés du presse-garniture sont alors emboitées dans une gaine, dont le diamètre intérieur est suffisant pour le passage de la saillie.

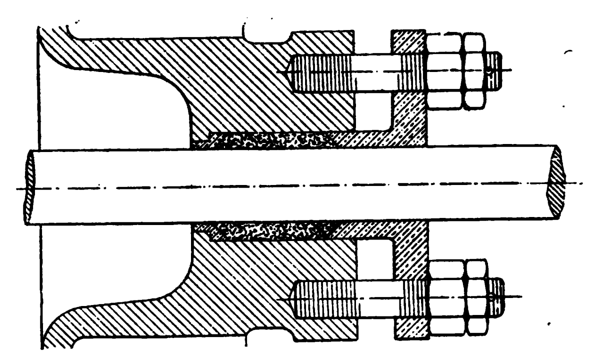


Fig. 158. — Garniture de tige de piston (avec bague de fond et presse-garniture en une seule pièce).

L'étoupe primitive a été généralement remplacée par des tresses d'amiante, ou par des bagues de métal blanc tendre, diversement combinées.

Il est important de bien graisser la tige, qu'on entoure à cet effet d'une mèche alimentée par un godet.

La tige s'emmanche dans la *tête* ou la *crosse de piston* (fig. 159), qui porte les *patins* coulissant dans les *glissières*, et le tourillon, sur lequel s'articule la bielle. Dans les grandes machines, confiées à un personnel spécial, on prévoit des moyens de réglage des patins (fig. 159), pour compenser l'usure. Les appareils de réglage non seulement compliqueraient trop les petites machines, mais risqueraient bien souvent d'être maladroitement manœuvrés. On se contente alors du réglage par addition de cales contre les patins ou sur les supports des glissières.

Quand les machines tournent indifféremment dans les

deux sens, les glissières fonctionnent également des deux côtés de la tête de piston ; la pression sur les glissières est

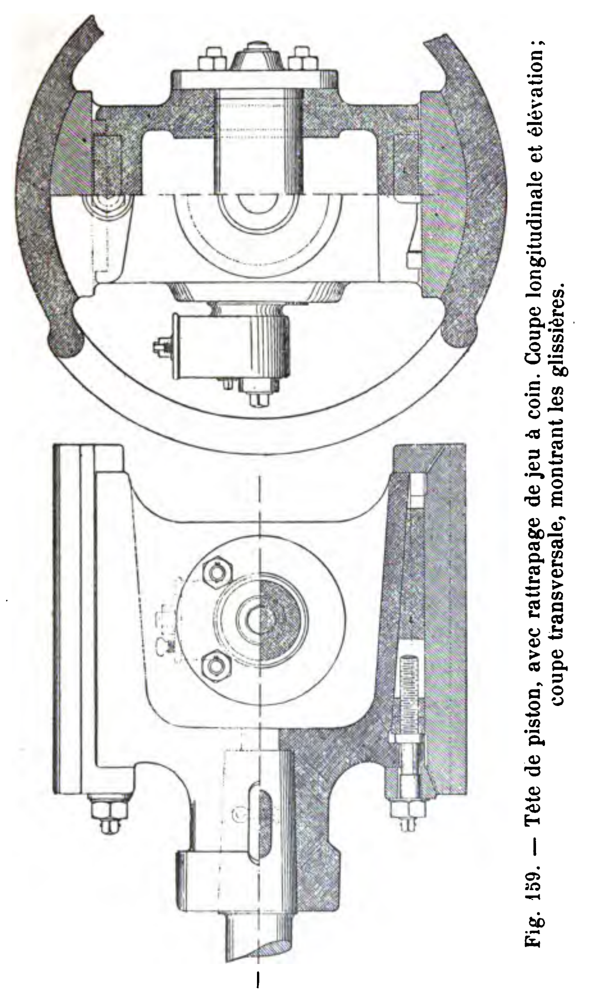


Fig. 159. — Tête de piston, avec rattrapage de jeu à coin. Coupe longitudinale et élévation ; coupe transversale, montrant les glissières.

à peu près constamment dirigée dans la même direction, lorsque la rotation n'a lieu que dans un sens.

La surface de portée des glissières peut rarement être aussi rapprochée de l'axe du cylindre qu'il serait désirable : le patin doit être assez long pour qu'il n'en résulte pas une augmentation excessive de charge sur l'une de ses extrémités. L'*arc-boutement* pourrait se produire avec un patin très court et très éloigné de l'axe du cylindre.

74. Bielles. — La bielle se compose de deux *têtes* et du *corps* qui les relie. Elle est soumise à des efforts alternatifs de traction et de poussée, qu'on peut calculer : on détermine en conséquence la section à lui donner en chaque point.

La *petite tête* ou le *pied de bielle* s'articule sur la tête de piston et la *grosse tête* sur le tourillon de la manivelle. Les deux tourillons que relie la bielle, ont des dimensions suffisantes pour supporter sans flexion appréciable les efforts qu'ils transmettent, et aussi pour offrir une surface de portée ou de contact assez grande pour assurer un graissage constant et éviter l'usure rapide et le *grippement* des surfaces.

Les tourillons sont en acier, ou en fer cémenté et trempé ; les parties de la bielle qui portent sur les tourillons sont garnies de bronze ou d'alliages dits *métaux blancs*. La forme la plus simple consiste en bagues solidement encastrées dans la bielle, et frottant sur les tourillons. Cette disposition, fréquente pour les bielles d'accouplement des locomotives, est rarement employée pour les bielles, dites *motrices*, dont il est question ici. Le montage n'est généralement pas possible avec cette disposition simple : il faut que la bielle puisse entrer sur les tourillons par un déplacement latéral suivant l'axe de ces tourillons, ou bien que les tourillons soient amovibles.

On préfère, en général, employer deux coussinets demi-cylindriques, qui, réunis dans une *cage*, et serrés l'un contre l'autre, forment une bague complète : la bielle porte des dispositifs permettant le serrage de ces coussinets. Le montage et le démontage sont alors possibles et faciles. En

outre, l'usure, qui se produit principalement dans la direction de l'axe de la bielle, ovalise les coussinets : on peut alors, en les démontant et en limant leurs surfaces de con-

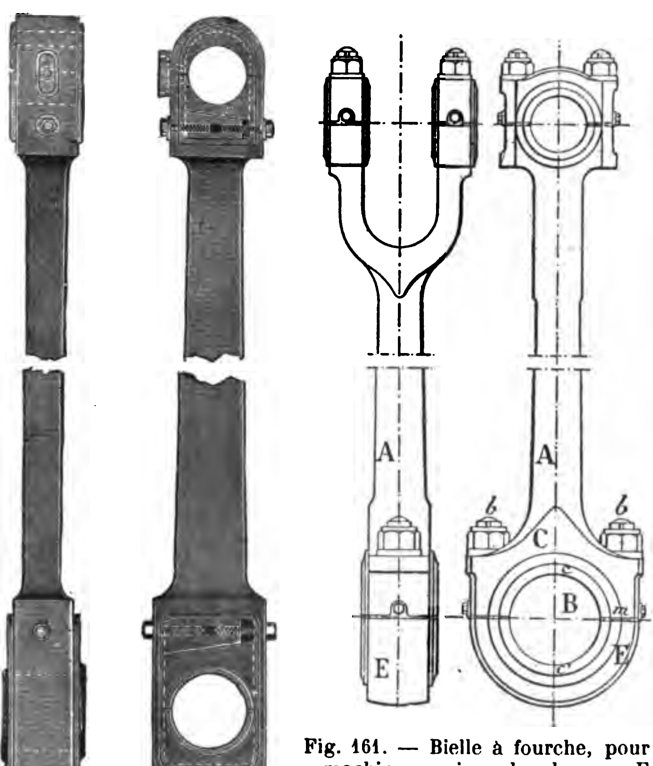


Fig. 160. — Bielle motrice : têtes simples avec réglage à coin (d'après Thurston).

Fig. 161. — Bielle à fourche, pour machine marine ; le chapeau E porte deux parties filetées, sur lesquelles se vissent, en *b*, *b*, les écrous de serrage (d'après M. Demoulin).

tact (ou bien en retirant des cales minces disposées d'avance entre ces surfaces) se rapprocher de la surface cylindrique primitive, dont le diamètre dépasse très légèrement celui du tourillon. C'est ce qu'on appelle rattraper le

jeu des articulations. Cette opération demande à être exécutée avec soin ; bien faite, elle prolonge la durée du service de la machine sans grande réparation.

La petite tête est simple (fig. 160), ou à fourche (fig. 161). Cette seconde disposition simplifie la tête de piston, mais complique la bielle; la transmission ne se fait bien que si les deux tourillons portent également sur les deux branches de la fourche.

La petite tête peut présenter une disposition de réglage comme la grosse tête; mais ce réglage est moins utile, car elle s'use moins, parce qu'elle n'a qu'un mouvement d'oscillation de faible amplitude sur son tourillon.

Le réglage d'une tête augmente ou raccourcit la longueur de la bielle, suivant la disposition adoptée. On tient compte de cette variation en donnant primitivement au piston un espace libre un peu plus fort du côté où le réglage de la bielle diminuera le jeu.

75. Arbres et manivelles. — L'arbre d'un moteur, soumis à la poussée et à la traction des bielles, à la traction des

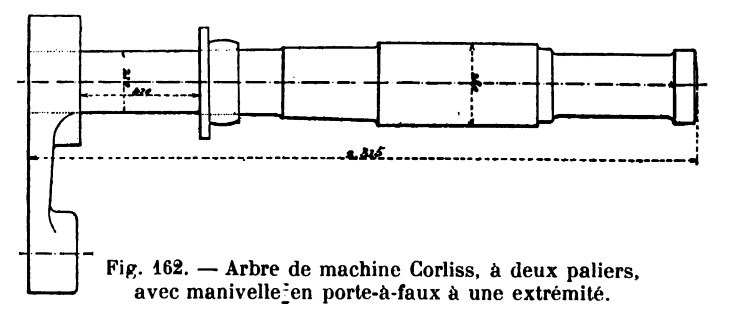


Fig. 162. — Arbre de machine Corliss, à deux paliers, avec manivelle en porte-à-faux à une extrémité.

courroies, au poids des volants, à la réaction de ses coussinets de support, travaille à la *flexion* et à la *torsion*. Il est forgé en acier ou en fer; les arbres en fonte ne sont plus guère employés pour les machines à vapeur.

La manivelle est rapportée à l'extrémité de l'arbre (fig. 162),

ou l'arbre est coudé, quand les manivelles sont comprises entre les paliers ; l'arbre est forgé avec ses coudes, ou bien il est composé de plusieurs parties assemblées.

La manivelle rapportée, plus simple que le coude, se trouve placée *en porte-à-faux* à l'extrémité de l'arbre ; il en résulte une augmentation de l'effort sur les paliers ; on doit la disposer de manière à rapprocher autant que possible du palier l'axe de la bielle (fig. 163). La manivelle est parfois remplacée par le *plateau-manivelle*, mieux équilibré et moins dangereux pour le conducteur de la machine.

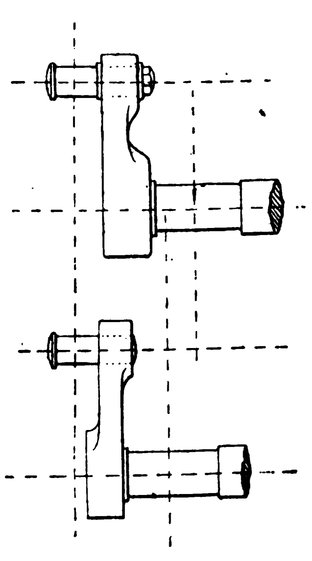


Fig. 163. — Deux dispositions de manivelle (d'après Raffard) ; la seconde a l'avantage de placer l'axe de la bielle plus près du palier.

L'arbre tourne dans des pièces cylindriques en bronze ou en métal blanc, composées en général de deux coussinets demi-cylindriques, contenus dans un support nommé palier, qui fait corps avec le bâti. Il y a généralement deux paliers au moins. Ils sont souvent munis de disposition de réglage des coussinets.

Les arbres doivent parfois résister à une poussée longitudinale. On peut équilibrer la poussée en terminant l'arbre par un *pivot* ou surface plane, qui tourne sur une *crapaudine*. Mais ces pivots ne sont pas toujours applicables, notamment si l'arbre est coudé : on doit alors recourir à des *collets* sur l'arbre, qui appuient contre des butées fixes. Les arbres d'hélice de navire offrent un exemple typique de cette disposition, toute la poussée de l'hélice étant transmise longi-

tudinalement par l'arbre qui la fait tourner. Ils sont munis de plusieurs collets (souvent une dizaine), qui appuient contre les coussinets du *palier de butée*, placé entre l'hélice et la machine motrice. Le grand frottement, inévitable dans ce palier de butée, est une cause importante de perte de travail.

Quelquefois les arbres des machines sont verticaux, et doivent alors être supportés par un pivot ou par des collets.

76. Graissage des mécanismes. — Les surfaces frottantes des mécanismes sont lubrifiées par des huiles, d'origine animale, végétale ou minérale, ces dernières étant souvent les moins coûteuses. L'huile doit pénétrer sur toutes les surfaces frottantes. On ménage à cet effet, sur l'une des surfaces, des canaux ou *pattes d'araignée*. Lorsqu'une portion de ces surfaces est toujours découverte, on l'entretient garnie d'huile ou on la plonge dans un bain d'huile : telles sont les glissières des têtes de piston, les fusées des essieux de chemins de fer, qui ne portent de coussinet qu'à leur partie supérieure.

Pour les petits appareils et pour les articulations qui ne transmettent pas de grands efforts, comme les mécanismes de distribution des locomotives, on se contente souvent d'un simple trou de graissage, qui débouche sur les surfaces frottantes de l'articulation : on verse un peu d'huile dans ce trou. En l'agrandissant un peu, on peut y loger un morceau de mèche en coton, qui conserve une petite provision de matière lubrifiante.

Les articulations importantes sont munies de *godets graisseurs*, d'où part un conduit qui débouche dans les *pattes d'araignée*. Ce conduit s'élève jusqu'à la partie supérieure du godet, et une mèche de graissage, formant siphon, débite l'huile goutte à goutte. On fait varier le débit en serrant plus ou moins les mèches. Ce système est d'un réglage un peu délicat, et a le défaut de débiter l'huile pendant les arrêts de la machine. Les graisseurs sans mèche



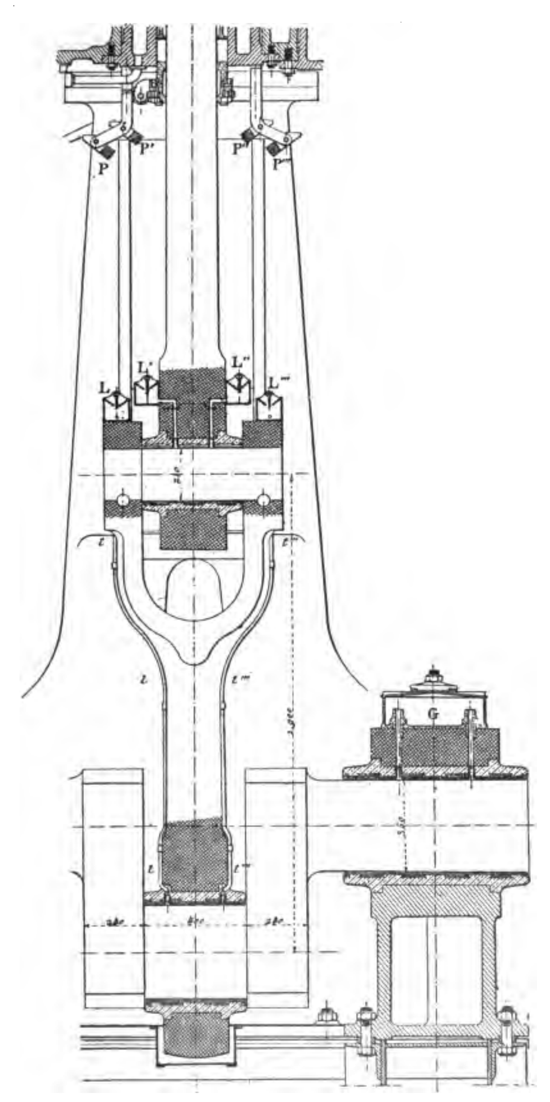


Fig. 164. — Graissage des deux têtes de la bielle motrice d'une machine marine pilon par les *lécheurs* L, L', L'', L''', et par les pinceaux P, P', P'', P''', et graissage d'un palier par le godet G, muni de mèches non figurées.

sont plus commodes ; on fait souvent usage d'une épinglette jouant dans un petit trou ou même d'un simple trou de très petit diamètre. Ces deux dispositions ne conviennent que pour des articulations soumises à des secousses ; elles exigent une fermeture étanche des godets.

Lorsque les machines doivent tourner longtemps sans arrêt, comme les machines marines, il faut assurer un graissage continu des articulations mobiles, telles que les têtes de bielles ; les *lécheurs* (fig. 164), montés sur ces articulations, prennent à chaque révolution un peu d'huile sur

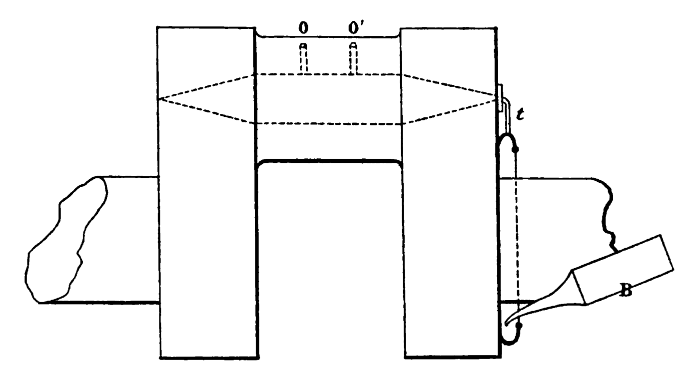


Fig. 165. — Graissage par canaux intérieurs de tourillon d'arbre coudé.

des pinceaux fixes constamment imbibés. En pareil cas, un réservoir central dessert par une série de tuyaux les diverses articulations.

On alimente aussi les surfaces frottantes par des canaux percés dans l'intérieur des pièces et débouchant à la surface du tourillon. Le tourillon creux de l'arbre coudé de la figure 165 est alimenté par la burette B, versant l'huile dans une gouttière circulaire, qui entoure l'arbre, et d'où part le tuyau *t* ; l'huile s'échappe à la surface du tourillon par les trous O, O'.

Les manivelles des machines horizontales sont souvent

lubrifiées par un tuyau *b* (fig. 166), formant contre-manivelle, et terminé par la coupe *a* : cette coupe reçoit l'huile, débitée par le godet *d*, que porte le pied *f*.

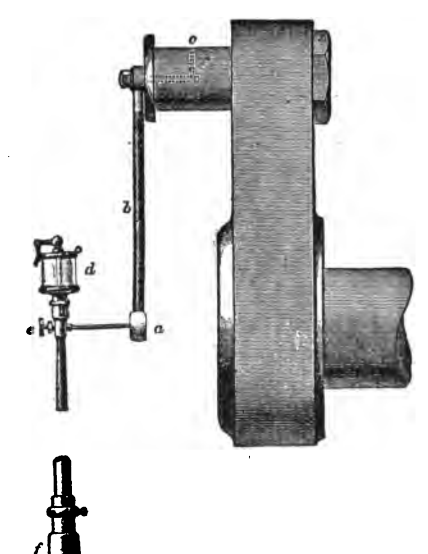


Fig. 166. — Graissage de manivelle de machine horizontale. L'huile, contenue dans le réservoir *d*, est versée dans la coupe *a*, avec un débit réglé par le robinet *e*. De *a*, l'huile est envoyée dans le tuyau *b*, par suite du mouvement de rotation, puis dans un canal percé dans l'axe du tourillon de la manivelle, et débouche enfin par les orifices *c*, entre le tourillon et le coussinet.

Au lieu d'huile, on emploie quelquefois des graisses pâteuses, qui se répandent moins que l'huile sur les diverses parties de la machine : cette graisse est contenue dans des godets, avec couvercle à vis formant piston, qui refoule la graisse dans les conduits et les pattes d'araignée, quand on le tourne. Ce graissage, très propre, est en général inférieur à celui qu'on obtient avec l'huile ; le débit de la matière lubrifiante est moins régulier.

A la partie inférieure des machines, des récipients reçoivent l'huile en excès. Cette huile, après filtrage, est utilisée de nouveau. Dans les machines rapides, un graissage très abondant est nécessaire ; il en résulte des projections désagréables, qu'on supprime en enfermant les bielles dans une caisse close, contenant un bain d'huile.

Les têtes de bielle viennent barboter à chaque tour dans

ce bain, projetant l'huile sur les diverses articulations du mécanisme (fig. 169).

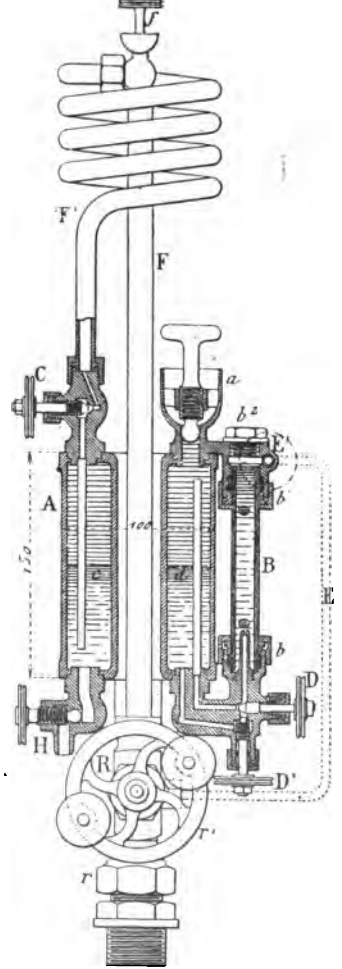


Fig. 167. — Graisseur à condensation Bourdon et Hamelle.

Dans certaines machines rapides, le graissage est assuré à l'aide d'une pompe refoulant l'huile sous forte pression entre les surfaces frottantes : cette disposition exige une enveloppe recueillant l'huile qui s'échappe au dehors. On cherche ainsi à maintenir constamment entre les surfaces une mince couche d'huile, qui les empêche de porter l'une contre l'autre.

77. Graissage des pistons et des distributeurs de vapeur. — Il est presque toujours nécessaire de graisser les pistons et les distributeurs de vapeur, qui frottent contre la fonte des cylindres, bien que l'eau condensée puisse réduire le frottement. Les matières employées pour ce graissage doivent conserver leurs propriétés lubrifiantes à la température de la vapeur qui travaille dans le cylindre : quand cette température est très élevée, certaines huiles se décomposent, d'autres

deviennent extrêmement fluides. Les huiles minérales sont les meilleures pour cet usage.

On graisse séparément le piston et le tiroir ou les distributeurs de vapeur, ou bien on se contente d'introduire un peu d'huile dans le courant de vapeur, qui lubrifie successivement les diverses surfaces frottantes.

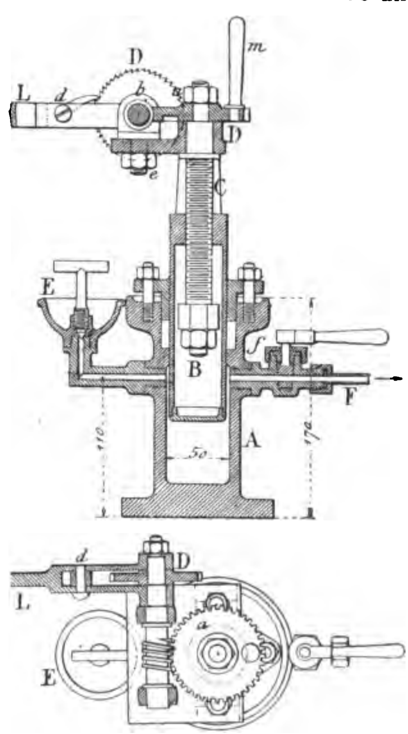


Fig. 168. — Graisseur Mollerup.

Les petites machines sont graissées par intermittences, en faisant communiquer le cylindre avec un petit réservoir d'huile à deux robinets.

Pour les machines de quelque importance, le graisseur continu est meilleur et dépense moins d'huile. Les *graisseurs à condensation* reçoivent l'eau provenant de la liquéfaction de la vapeur, prise sur le cylindre à lubrifier ou directement à la chaudière ; cette eau déplace l'huile petit à petit et la chasse dans les conduits de graissage. Les dispositions de détail de ces appareils sont assez variées : souvent on fait passer l'huile dans un tube en verre qui la montre goutte à goutte ; ces gouttes s'élèvent dans l'eau qui remplit le tube. Des robinets permettent de régler le débit (fig. 167).

Les *graisseurs mécaniques* réalisent un débit exactement réglé : le graisseur Mollerup (fig. 168) se compose d'un corps de pompe, qu'on remplit, par l'entonnoir E, d'huile, que déplace le plongeur B : la descente est commandée avec une vitesse très faible, qu'on règle à volonté, à l'aide de la roue à rochet D, entraînée par le levier L, dont l'extrémité est rattachée à une pièce mobile du moteur.

D'autres graisseurs constituent une véritable pompe aspirante et foulante, dont le fonctionnement sans arrêt est indéfini.

CHAPITRE IX

DISPOSITIONS D'ENSEMBLE DES MACHINES

78. Classification. — Il est commode, pour l'étude des moteurs, de grouper ceux qui rendent les mêmes services. C'est ainsi qu'on réunit en grandes familles :

Les moteurs fixes, à petite et à moyenne vitesse;

Les moteurs fixes, à grande vitesse;

Les locomobiles et les machines demi-fixes;

Les machines qui servent à l'élévation de l'eau;

Les machines d'extraction; les machines soufflantes, les compresseurs, d'autres moteurs destinés à des applications spéciales;

Les locomotives;

Les machines de bateaux;

Les machines rotatives;

Les machines à entraînement direct, les turbines ont été examinées dans le chapitre VII.

On peut faire rentrer dans ces familles la plupart des appareils employés. Dans cette classification tout artificielle, une même famille comprend souvent des types de machines différents, tandis que d'une famille à l'autre, il existe de grandes analogies : c'est ainsi que des souffleries et des élévations d'eau sont commandées par des moteurs fixes qui ne présentent guère de dispositions spéciales pour cet emploi.

Dans chaque famille, on peut subdiviser les machines en tenant compte de la vitesse de marche, de la pression de la vapeur à l'admission et à l'échappement, du nombre de cylindres successifs, du mécanisme de distribution de la

direction de l'axe des cylindres, de la disposition des bâtis, de la forme des principaux organes[1].

79. Moteurs fixes à vitesse modérée. — En parlant de la *vitesse* des moteurs, on entend la *vitesse angulaire* de l'arbre qu'ils commandent, habituellement définie par le nombre de tours en une minute. La *vitesse moyenne du piston*, en mètres par seconde, calculée en divisant par 60 le produit du nombre de tours en une minute par le double de la course en mètres, ne varie pas comme la vitesse ainsi entendue, car les machines lentes ont généralement une course plus longue que les machines rapides.

Au-dessous de 70 à 80 tours par minute, le moteur est dit à *petite vitesse*. La *moyenne vitesse* comporte 80 à 160 tours : au-dessus les machines sont dites à *grande vitesse*. Pour un fonctionnement prolongé, c'est encore la petite vitesse et la moyenne qu'on préfère généralement, comme donnant les moindres consommations et la marche la plus sûre. Dans les machines à moyenne vitesse, la distribution se fait généralement par tiroirs. Pour la petite vitesse, les obturateurs Corliss et les soupapes sont d'un emploi fréquent. On commence même à les appliquer, avec le déclenchement, jusqu'à 150 tours par minute.

La *machine à balancier*, monocylindrique ou du système Woolf, est un type ancien et célèbre, qu'on ne construit plus aujourd'hui, sauf pour certains usages spéciaux qui justifient le balancier. La tête du piston est guidée en ligne droite par le *parallélogramme de Watt* ou par des *glissières* : cette dernière disposition est usitée surtout aux États-Unis. La machine est d'habitude très lente : elle fait 30 à 50 tours par minute. Jusque vers l'année 1860, la machine à balancier a été recherchée comme le meilleur moteur des fila-

[1] Une étude générale de la machine à vapeur ne peut donner des détails étendus sur les catégories si nombreuses de machines, mais doit se borner à l'examen sommaire de certains types principaux.

tures et de tous les établissements qui exigent une puissance motrice régulière et une vitesse uniforme : puis la simplicité et le prix moindre des *machines horizontales* les a fait accueillir avec une faveur croissante. L'usure presque nulle de certaines machines à balancier n'est pas due à l'emploi de cet organe de transmission, mais à des conditions de marche, qu'on pourrait retrouver dans les machines horizontales, si on ne craignait pas d'augmenter le prix d'achat et la dépense de combustible : une marche lente et une pression modérée de vapeur sont d'excellentes conditions pour ménager les appareils.

Pour les puissances ne dépassant pas 200 ou 300 chevaux, un cylindre unique peut suffire. Avec une bonne distribution par mécanismes à déclenchement, la consommation de vapeur n'en est pas exagérée. Mais pour des puissances plus fortes il convient en général d'employer soit deux cylindres, de préférence compound, en tandem ou avec deux manivelles à angle droit, soit trois cylindres, dont deux en tandem, avec la triple expansion, soit même quatre cylindres formant deux groupes tandem.

Les constructeurs de machines fixes emploient de plus en plus la disposition pilon, qui occupe peu de place en plan ; l'appareil repose sur un massif de fondation simple ; l'arbre est bien maintenu par ses coussinets, entre lesquels se placent les coudes.

Ces machines pilon sont généralement compound ou à triple expansion, soit avec trois cylindres et trois manivelles, soit avec quatre cylindres sur deux manivelles, et quelquefois à quadruple expansion.

80. Moteurs fixes à grande vitesse. — Plusieurs motifs paraissent indiquer la supériorité des machines à grande vitesse : à égalité de puissance, elles sont plus petites et moins coûteuses que les machines lentes ; la rapidité de l'évolution de la vapeur y réduit l'influence des parois ; leur vitesse même est, dans bien des cas, plus convenable

pour l'application, par exemple quand elles doivent commander des machines dynamo-électriques.

Pour ces motifs, les moteurs à grande vitesse sont fréquemment employés. Cependant, dans la plupart des installations permanentes, lorsque les dépenses de premier établissement ne sont pas impérieusement limitées, on préfère les moteurs plus lents. En marche courante, ces derniers consomment moins de vapeur, dont la dépense est augmentée par les laminages. inévitables dans les machines rapides. Il est probable que celles-ci dépensent, en outre, un peu plus de matières grasses; l'entretien en est plus dispendieux, et elles sont plus exposées aux avaries et aux chômages.

Les moteurs rapides, comme les moteurs lents, sont horizontaux ou pilon (fig. 169). D'ailleurs les deux genres de machines ne se distinguent pas nettement, les vitesses adoptées croissant en série continue; certaines machines rapides ne diffèrent guère des machines plus lentes que par leur régulateur.

Le tiroir équilibré, plan ou cylindrique, est fréquemment employé dans les moteurs à grande vitesse. Certains sont munis de tiroirs superposés ou concentriques; d'obturateurs oscillants, comme ceux des machines Corliss, mais sans déclic; de distributeurs à rotation continue.

Ces machines sont monocylindriques, compound, ou à triple expansion. Le régulateur agit souvent en modifiant le calage de l'excentrique.

Pour équilibrer, en partie, les pièces animées d'un mouvement rectiligne alternatif, on fait parfois agir les pistons des machines rapides à deux cylindres sur deux manivelles calées à l'opposé l'une de l'autre, et non à angle droit comme d'habitude (fig. 170).

On rapproche beaucoup les plans des deux mécanismes ainsi équilibrés, en prolongeant la tige de l'un des pistons (le plus grand), de manière à loger le petit cylindre en partie sous le grand, la machine étant supposée du type pilon : on

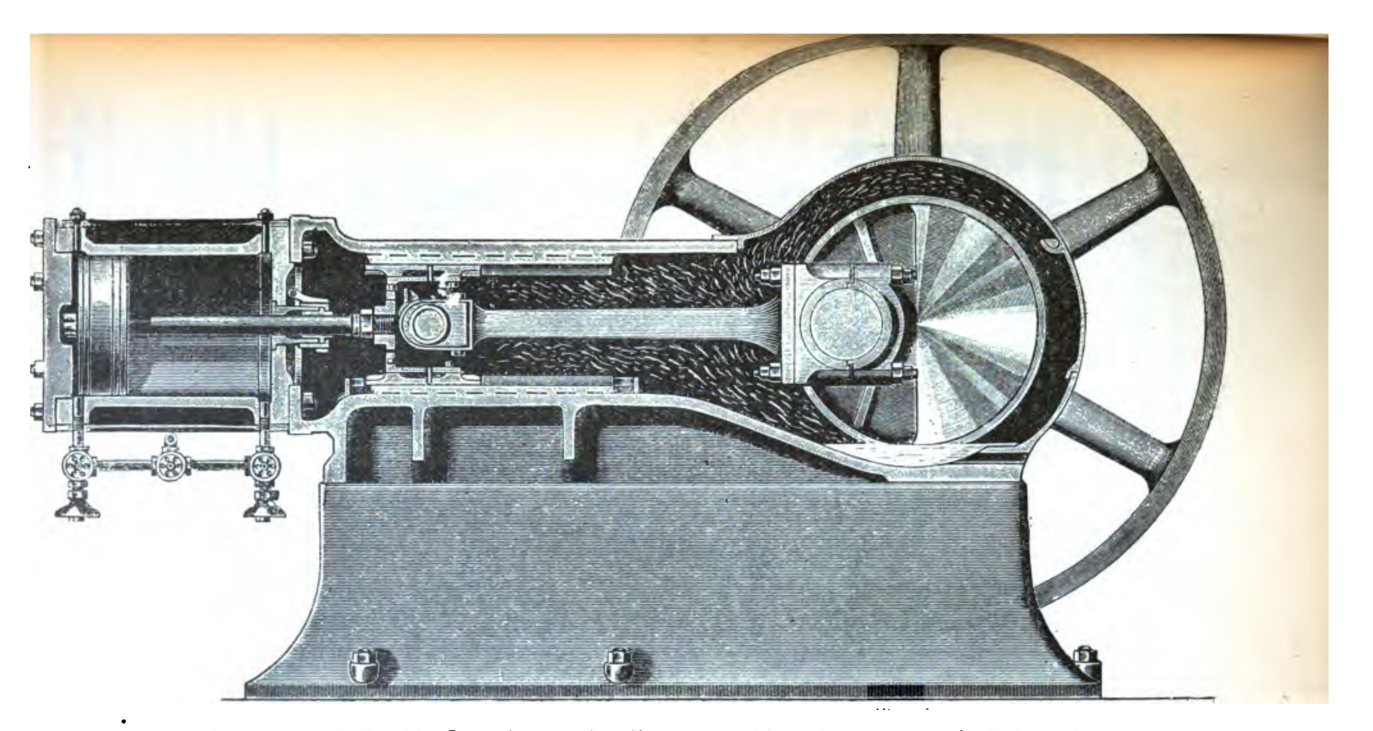


Fig. 169. — Machine américaine Ide. La puissance des diverses machines de ce type varie de 8 à 250 chevaux, et le nombre de tours par minute de 500 à 225. Montage du cylindre en *porte-à-faux*.

voit que la distance des deux plans peut être réduite au rayon du petit cylindre plus le rayon de la tige et l'épaisseur de la paroi en fonte.

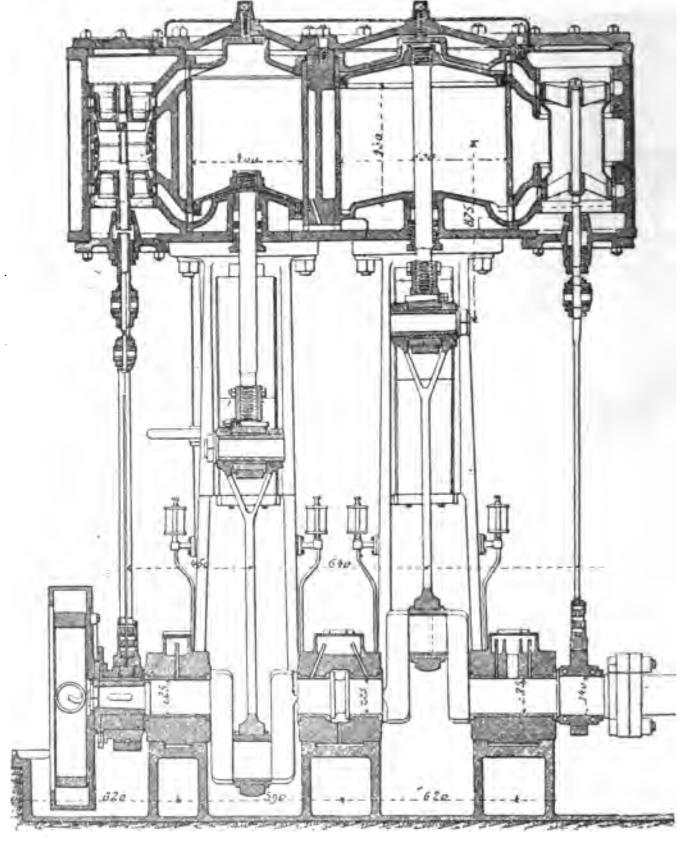


Fig. 170. — Machine compound pilon à grande vitesse, avec manivelles à 180°, système Hoffmann. Les tiroirs concentriques du petit cylindre donnent une admission de 5 à 50 p. 100; 200 à 300 tours par minute.

La marche à *simple effet* permet d'éviter les chocs, qui résultent du changement de sens des efforts dans la

machine à *double effet*. Avec le simple effet, la même face du piston est toujours pressée par la vapeur; les efforts transmis à la bielle et à la manivelle peuvent conserver une direction constante, pourvu que les forces d'inertie ne dépassent pas la contre-pression résistante sur le piston, pendant la seconde moitié de la course de retour.

Pour réaliser cette condition, de longues périodes de compression sont nécessaires ; la résistance qui en résulte risquerait d'être insuffisante dans une machine à condensation : on fait alors usage d'un piston spécial refoulant un matelas d'air.

Les types de machines rapides à simple effet sont nombreux, monocylindriques, compound, du système Woolf, c'est-à-dire avec un seul organe de distribution sur le trajet de la vapeur entre les deux cylindres successifs. Souvent les manivelles sont calées à l'opposé l'une de l'autre. La bielle peut être articulée sur le piston même, assez long pour être bien guidé en ligne droite, malgré la suppression des glissières de tête de piston.

Dans la machine Willans à triple expansion (fig. 171), la vapeur est distribuée par des tiroirs cylindriques montés sur une tige unique, qui se meut suivant l'axe du cylindre; ces tiroirs jouent à l'intérieur d'un fourreau, qui porte les pistons moteurs; c'est le mouvement relatif du tiroir, par rapport au piston moteur, qui effectue la distribution, en mettant en communication le dessus du piston, tantôt avec la partie supérieure du fourreau, pour l'admission, tantôt avec la partie inférieure, pour l'échappement. A cet effet, chacun des trois tiroirs, V_2, V_5, V_8, se meut devant des trous, 2, 5 et 8 du fourreau. En outre l'admission est interrompue après le parcours, par le piston, d'une fraction déterminée de sa course, lorsque d'autres trous du fourreau, 1 pour le premier cylindre, 4 pour le second, et 7 pour le troisième, passent dans la garniture que traverse le fourreau.

Ce mécanisme rentre dans la classe des distributions à deux tiroirs superposés : la tige centrale produit la distri-

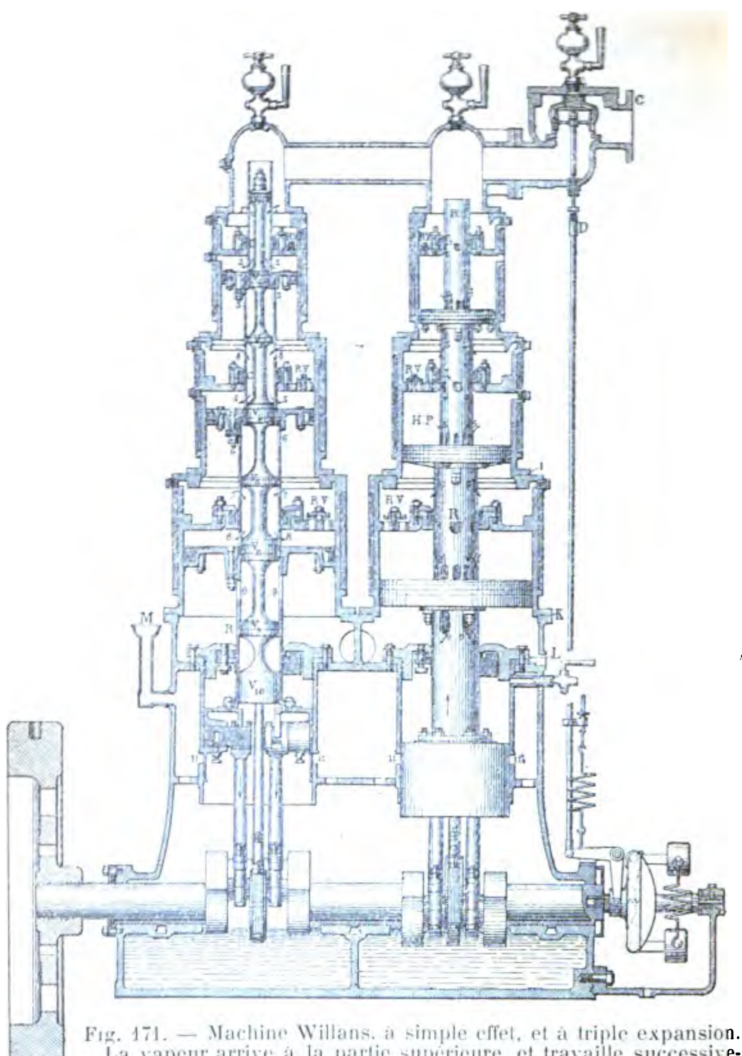


Fig. 171. — Machine Willans, à simple effet, et à triple expansion. La vapeur arrive à la partie supérieure, et travaille successivement sur les trois pistons, en passant par les orifices 1 et 2, 4 et 5, 7 et 8. Les tiroirs cylindriques V_2, V_5, V_8, jouent respectivement sur les ouvertures 2, 5, 8, produisant l'admission et l'échappement : en outre, l'admission est interrompue par le passage des ouvertures 1, 4, 7, dans les garnitures de la tige creuse. Le piston inférieur agit sur un matelas d'air : l'air peut pénétrer par les ouvertures 11. R.V., soupapes de sûreté des cylindres.

bution principale, dans son mouvement par rapport au fourreau, qui limite l'admission seule.

Pendant la course montante, la vapeur passe du côté supérieur au côté inférieur de chaque piston, en remplissant les capacités qui forment les deux réservoirs intermédiaires; l'échappement du dernier cylindre se fait dans une chambre qui communique avec le condenseur ou avec l'atmosphère. Le guide de l'articulation de la bielle est un piston qui comprime un matelas d'air, pendant cette course montante: la période de compression de la vapeur, peu étendue, ne crée pas une résistance suffisante pour éviter à grande vitesse le changement de sens des efforts dans les pièces à mouvement alternatif. Les trous 11 servent à l'entrée de l'air dans la chambre où il est comprimé.

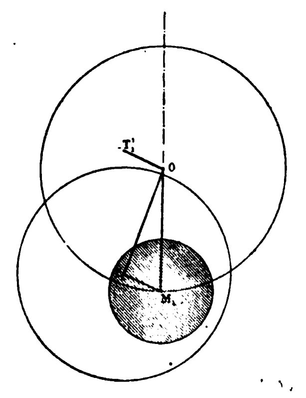


Fig. 172. — Calage de l'excentrique de la machine Willans, suivant M_1 T_1, sur le tourillon de la manivelle motrice. OT_1 est alors le rayon de l'excentrique qui commande le tiroir : mais le tiroir joue dans la tige creuse, en relation avec la manivelle OM_1; d'après la règle de la composition des excentriques, la résultante de OT_1 et de OM_1 est OT'_1, qui est bien l'excentrique normal.

La distribution doit être réglée de manière à ramener à peu près la pression à la valeur initiale pour chaque cylindre à la fin de la course ascendante; on voit sur le dessin, dans le fond des cylindres, des soupapes (R. V.) s'ouvrant si la compression est excessive; en outre, la pression dans chaque réservoir intermédiaire, de capacité variable, doit être à peu près celle de la vapeur du cylindre qui l'alimente au moment où s'ouvre l'échappement de ce cylindre. Un régulateur commande une lanterne équilibrée placée sur l'admission de vapeur, en C.

La règle de la composition des excentriques détermine le calage de l'excentrique de la machine Willans : on veut réaliser la distribution qui correspondrait à un excentrique de rayon OT'_1 (fig. 172), la manivelle motrice étant en OM_1. Le rayon OT_1 diagonale du parallélogramme construit sur OM_1 et OT'_1, commande la tige centrale, qui se meut dans le fourreau conduit par OM_1, parce que l'excentrique est calé sur le tourillon moteur, suivant M_1T_1, égal et parallèle à l'excentrique fictif OT'_1.

La figure 171 représente une machine Willans à triple expansion, avec deux manivelles à angle droit. Le type compound n'en diffère que par la suppression du premier cylindre de chaque groupe.

81. Locomobiles et machines demi-fixes. — Des roues portent les *locomobiles*, propres aux emplois temporaires, en agriculture et pour les constructions; on peut aisément les faire voyager sur les routes. La chaudière est du type locomotive (fig. 173), ou bien cylindrique avec *tubes en retour*. Le mécanisme, à un cylindre ou à deux cylindres, généralement compound, est porté par une selle qui pose sur la chaudière : la distribution se fait par un tiroir, parfois par deux tiroirs, du système Meyer. Quelquefois elle comporte un changement de marche par coulisse.

Les roues d'une locomobile, installée à demeure, deviennent inutiles; cette suppression donne la *machine demi-fixe*, souvent employée comme moteur d'ateliers; le montage en est facile et moins coûteux que pour un appareil équivalent formé d'une chaudière et d'une machine séparées. Le moteur demi-fixe peut d'ailleurs fonctionner aussi économiquement que bien des machines fixes de même puissance; la position des cylindres supprime même la perte de chaleur dans la tuyauterie et permet une alimentation facile des enveloppes.

La chaudière, qui porte la machine, repose sur une fondation simple.

Ces machines demi-fixes se construisent pour des puissances moyennes, et même assez grandes, atteignant

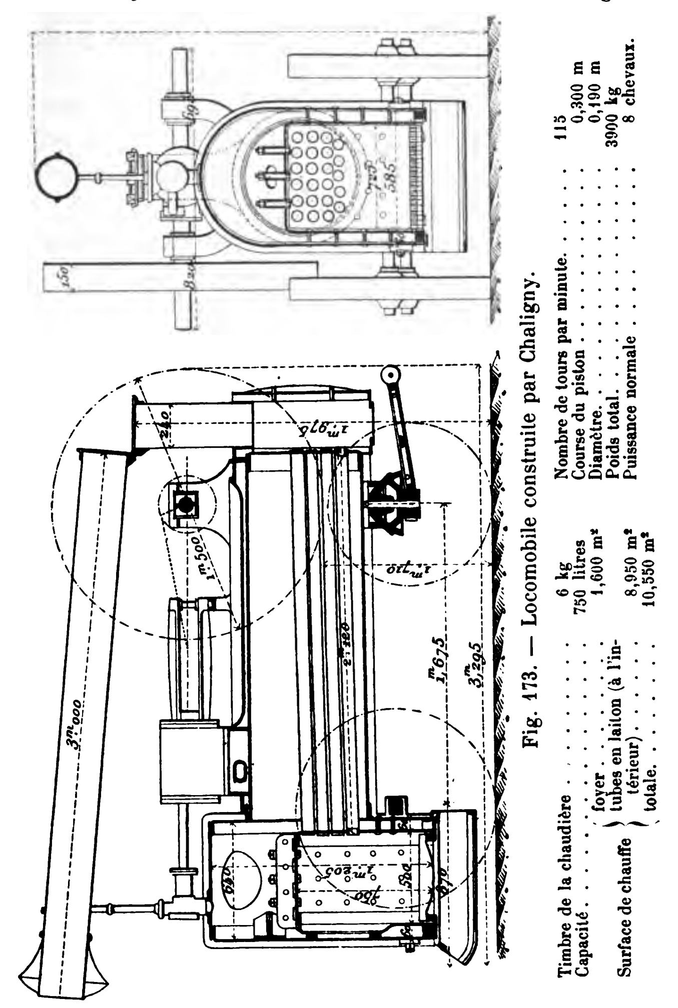


Fig. 173. — Locomobile construite par Chaligny.

Timbre de la chaudière		6 kg
Capacité		750 litres
Surface de chauffe	foyer	1,600 m²
	tubes en laiton (à l'intérieur)	8,950 m²
	totale	10,550 m²
Nombre de tours par minute		115
Course du piston		0,300 m
Diamètre		0,190 m
Poids total		3900 kg
Puissance normale		8 chevaux.

250 chevaux (machines demi-fixes à l'exposition de 1900). Il devient alors assez difficile de donner à la chaudière une

dimension suffisante, et le chômage de la chaudière paralyse la machine.

Pour les faibles puissances, des moteurs analogues prennent le nom de *machines portatives*. Souvent alors la chaudière est verticale et le moteur lui est accolé.

Afin d'éviter le danger que peut présenter une chaudière à pression élevée pour un moteur domestique, la vapeur est quelquefois employée à la tension même de l'atmosphère, de sorte que la chaudière n'est soumise à aucune pression, et peut être fermée par un simple couvercle : la condensation est alors nécessaire.

Pour la commande des appareils tels que les grues, les treuils, et autres engins de manœuvre, on fait un fréquent usage de petits moteurs à deux cylindres sur manivelles calées à angle droit, souvent à changement de marche par coulisse. Lorsqu'il y a plusieurs mouvements à produire, comme dans une grue, ou bien on les commande par embrayages à l'aide d'un moteur unique, ou bien on installe un moteur séparé pour chaque mouvement.

On peut ranger dans la même classe les petits moteurs à vapeur qui servent à la propulsion des voitures sur routes ordinaires; c'est surtout la disposition des chaudières de ces moteurs qui est remarquable.

En reliant par une transmission l'arbre moteur aux roues, convenablement construites, on transforme la locomobile, munie d'un changement de marche à coulisse, en *locomotive routière* et en *rouleau compresseur*.

82. Élévations d'eau. — Les *machines d'épuisement* servent à extraire les eaux gênantes, et les rejettent hors des mines ou des terrains inondés, tandis que les *machines élévatoires* amènent l'eau aux endroits où elle est utile.

Avec les pompes qu'elles commandent, les machines qui servent à élever l'eau constituent un ensemble, dont on mesure le travail utile, en jaugeant la quantité d'eau élevée à une hauteur connue. Lorsque le refoulement se fait par

de longues conduites, les moteurs produisent en outre un travail qui correspond à la *perte de charge* dans la conduite, et qu'il est utile d'évaluer à part; la perte de charge est comme une hauteur supplémentaire à laquelle l'eau serait élevée.

L'épuisement des mines s'est fait longtemps à l'aide des machines de Cornouailles (fig. 109). On préfère généralement aujourd'hui les moteurs à rotation continue, parfois placés au fond des mines auprès de la pompe; l'emploi de la transmission électrique permet de maintenir au jour la machine à vapeur.

Les pompes à piston anciennement employées ne fonctionnaient convenablement qu'à une faible vitesse, souvent limitée à 30 tours par minute. Un progrès important est l'emploi des pompes rapides dites *express*, qui se prêtent à la commande directe par une machine à vapeur rapide, et par conséquent de dimensions restreintes, ou même par un moteur électrique.

Pour les élévations d'eau des villes, on emploie fréquemment des machines à mouvement de rotation, commandant les pompes en tandem; la disposition est horizontale ou verticale; cette dernière est commode dans certains cas pour placer la pompe à un niveau suffisamment bas. La marche de ces machines est souvent très lente, ce qui a l'inconvénient d'en exagérer les dimensions.

Le mouvement circulaire de l'arbre n'est évidemment pas indispensable, puisque le piston de la pompe, comme le piston moteur, a un mouvement rectiligne. La distribution des machines élévatoires à *action directe*, telle que celle de Worthington, a été mentionnée au § 56. L'emploi de la détente, avantageuse pour l'économie de vapeur, présentait une difficulté dans ces machines : la détente diminue la force motrice du commencement à la fin de la course, tandis que la force résistante, due à l'aspiration et au refoulement de l'eau, reste à peu près constante. On n'a plus de volant pour emmagasiner puis restituer le

travail résultant de l'excès de force motrice au début de la course.

Le compensateur des pompes Worthington (fig. 174) rem-

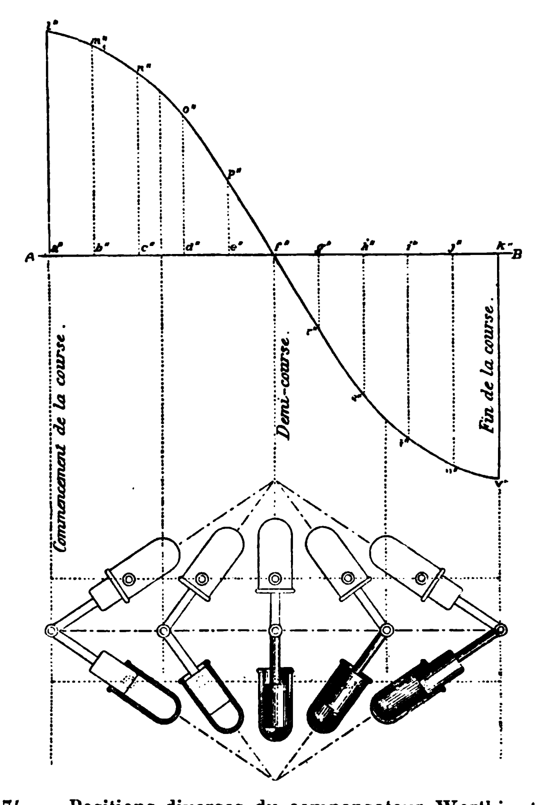


Fig. 174. — Positions diverses du compensateur Worthington. La courbe placée à la partie supérieure de la figure indique, par rapport à la base AB, d'abord l'excès, puis le défaut de la force motrice par rapport à la force résistante constante. La différence de travail qui en résulte est absorbée, puis restituée par les pistons compensateurs, entrant dans leur cylindre et en sortant.

place le volant : il se compose de deux cylindres oscillants, munis de pistons dont la tige s'articule sur la tige commune

du moteur et de la pompe. L'axe de ces cylindres oscillants, à mi-course du moteur, se place perpendiculairement à l'axe du mécanisme principal; les pistons de ces cylindres sont soumis à la pression de l'eau refoulée par les pompes ou à une pression plus forte; pendant la première moitié de la course, ils marchent contre cette pression, qui les pousse pendant la seconde moitié.

83. Machines d'extraction. — La machine d'extraction manœuvre, dans les puits de mine, les cages qui portent des wagonnets. Ces cages, l'une montante, l'autre descendante, sont suspendues à des câbles, qui, après avoir passé sur des *molettes* ou poulies de renvoi placées au-dessus du puits, s'enroulent en sens inverses sur deux bobines ou tambours, montés sur l'arbre de la machine motrice. Suivant le sens de rotation de cet arbre, les cages montent et descendent alternativement.

Les mines importantes donnent un fort tonnage à extraire; le poids de chaque cage, avec son chargement, atteint parfois 10 tonnes, et la vitesse d'ascension dépasse 12 m par seconde, dans des puits profonds de 500 et même de 1000 m. Les manœuvres, au fond et au jour, doivent être rapides.

La machine d'extraction est, avant tout, établie en vue de la commodité et de la simplicité du service; elle doit obéir docilement et sans retard à son conducteur, démarrer sans hésitation dans toutes les positions, tourner à volonté dans les deux sens, et exercer des efforts parfois très variables dans le cours d'une même manœuvre. Elle a deux cylindres, dont les pistons commandent deux manivelles calées à angle droit sur l'arbre, qui porte les bobines ou les tambours, sur lesquels s'enroulent, en sens inverses, les deux câbles des cages. Quelquefois verticale, elle est généralement horizontale.

La distribution se fait par tiroirs, soupapes, obturateurs oscillants; le changement de marche exige souvent un servo-moteur. Un frein à vapeur peut arrêter l'arbre.

84. Machines soufflantes, compresseurs, machines de laminoirs. — Il n'y a pas de différence essentielle entre la *machine soufflante* et le *compresseur;* seulement la première de ces machines refoule l'air à des pressions ne dépassant pas beaucoup celles de l'atmosphère (par exemple à une pression effective de 0,5 kg par cm²), tandis que les compresseurs donnent des pressions plus élevées (jusqu'à 120 kg par cm² dans certains cas).

Les moteurs de ces appareils n'offrent guère de dispositions spéciales résultant de leur application particulière : ce sont des machines horizontales ou pilon, avec commande directe du cylindre à vent monté en tandem et arbre à volant; généralement deux cylindres moteurs, simples ou de préférence compound, attaquent deux manivelles à angle droit. Le volant est utile, parce que le travail résistant croît du commencement à la fin de la course, tandis que le travail moteur décroît par suite de la détente de la vapeur : le cylindre à vent est même un instant moteur au début, lorsque l'air comprimé dans l'espace libre se détend. Une grande uniformité de rotation est d'ailleurs inutile.

Les machines de laminoirs sont de deux sortes. Si le laminoir tourne toujours dans le même sens, le moteur qui l'actionne doit avoir un fort volant, qui agit comme accumulateur de travail plus que comme régulateur de vitesse; c'est une machine horizontale, simple ou compound, ou bien une machine-pilon, qui tient moins de place dans la forge.

Les laminoirs *réversibles* sont actionnés par des machines à changement de marche par coulisse, à deux cylindres sur manivelles à angle droit, machines remarquables par la rapidité de la mise en train et du renversement de la rotation, malgré des dimensions considérables. Un servomoteur commande l'arbre de relevage; les tiroirs cylindriques conviennent pour réduire la fatigue de la distribution. On emploie aussi trois cylindres commandant trois manivelles calées à 120° : l'effort moteur est alors très

régulier [1]. Le volant est d'ailleurs inadmissible, parce qu'il gênerait le renversement de la marche. Aux cylindres simples on substitue quelquefois des groupes tandem de deux cylindres compound.

85. Locomotives. — La machine locomotive fonctionne à haute pression, sans condensation, avec de grandes variations de puissance et de vitesse. Les dispositions en ont été reproduites dans beaucoup d'autres moteurs ; elles sont caractérisées par la simplicité et la grande solidité des pièces, obtenue sans en exagérer le poids. C'est pour les locomotives que Séguin a imaginé la chaudière tubulaire (à tubes de fumée).

Le mécanisme de la locomotive à simple expansion comprend deux cylindres [2], dont les pistons attaquent un essieu par deux manivelles calées à angle droit : une coulisse de Stephenson ou un mécanisme équivalent conduit le tiroir. Les systèmes les plus fréquemment employés, après celui de Stephenson, sont ceux de Gooch, d'Allan, de Walschaerts ; on trouve aussi parfois celui de Joy et d'autres sans excentriques. Ce sont surtout les conditions de l'installation qui font choisir un de ces systèmes.

La double expansion est souvent adoptée dans les locomotives de construction récente, avec deux, trois ou quatre cylindres.

Deux cylindres exigent une disposition spéciale de démar-

[1] La machine reversible Ehrardt et Schmer, qui figurait à l'exposition de 1900, a trois cylindres de 1 m de diamètre et de course, avec coulisses de Stephenson et tiroirs cylindriques. Les trois manivelles à 120° donnent un moment moteur bien régulier même à petite vitesse. Avec une pression de vapeur de 9 kg par cm^2, la puissance indiquée, à la vitesse de 120 à 130 tours par minute, est de 3 500 à 4 000 chevaux. La vitesse maxima est de 180 tours. Un modèle plus grand de cette même machine a des cylindres de 1,3 sur 1,3 m. On entend par *moment moteur* le produit de la force tangentielle, qui fait tourner la manivelle, par le rayon de cette manivelle.

[2] Très exceptionnellement, on voit des locomotives à simple expansion ayant trois et quatre cylindres.

rage : le système Mallet permet de séparer complètement les deux cylindres, en ouvrant un échappement indépendant au premier et une admission spéciale au second.

La disposition à trois cylindres est rarement adoptée, parce que, sur la locomotive, elle se prête moins bien que d'autres à la régularité du moment moteur et à l'équilibrage des pièces à mouvement alternatif.

Dans le système Vauclain, il y a deux groupes formes chacun d'un cylindre à haute pression et d'un cylindre à basse pression superposés, avec tiroir cylindrique unique. Enfin, suivant une disposition très fréquente en France, on commande deux essieux différents à l'aide des cylindres à haute et à basse pression. Dans le système Mallet, ces deux essieux font partie de deux groupes articulés différents, ce qui donne à la locomotive une grande flexibilité pour la circulation sur les voies sinueuses. Dans les locomotives ordinaires, l'accouplement des deux essieux directement commandés permet un bon équilibrage des pièces à mouvement rectiligne [1].

Comme exemple d'une des plus puissantes locomotives de construction européenne, on peut citer la machine à grande vitesse type *Atlantic* (bogie, deux essieux couplés, un essieu porteur) du chemin de fer Paris-Orléans. Les dimensions principales sont les suivantes :

Chaudière :	
Diamètre intérieur	1,513 m
Hauteur de l'axe au-dessus du rail	2,700 —
Timbre	16
Longueur des tubes entre plaques	4,400 m
Diamètre extérieur des tubes	70 mm
Nombre (tubes à ailettes)	96
Surface de grille	3,1 m²
Surface de chauffe	239,4 —
Cylindres :	
H. P., diamètre	360 mm
B. P., diamètre	600 —

[1] Pour plus de détails sur les locomotives, consulter « La machine locomotive » par Ed. Sauvage, 4e éd. (Paris, 1904, Béranger).

Course des pistons	640 mm
Diamètre des roues motrices.	2,040 m
Poids en service	72,9 t

Dans des expériences faites sur une machine de ce type, un trajet de 13 km a été effectué à la vitesse moyenne de 112 km à l'heure. L'admission était de 53 et de 65 p. 100 respectivement dans les cylindres à haute et à basse pression. L'effort de traction moyen, sur la barre d'attelage derrière le tender, a été de 2 350 kg, ce qui correspond à une puissance utile de 972 chevaux. La puissance indiquée était en moyenne de 1830 et a même atteint 1900 chevaux.

86. Machines de bateaux. — Les appareils destinés à la grande navigation doivent brûler peu de charbon pour produire le cheval-heure ; il importe que le poids total en soit modéré et qu'ils n'occupent pas trop de place à bord ; il est nécessaire qu'ils soient assez robustes et assez simples pour fonctionner d'une manière continue et régulière, parfois pendant plusieurs semaines sans arrêt. Certains appareils de ce genre sont remarquables par leurs colossales dimensions.

On peut leur demander une puissance toujours à peu près uniforme, soit pour les paquebots à grande vitesse, soit pour les bateaux de charge à marche lente. Au contraire, la marine militaire exige des moteurs qui puissent fonctionner à des allures très différentes, ce qui est une difficulté sérieuse.

Les organes de propulsion, commandés par les moteurs, consistent en hélices ou en roues à aubes ; celles-ci, exclusivement usitées au début de la navigation à vapeur, ont généralement cédé la place à l'hélice. Cependant on en construit encore, pour des paquebots à courtes traversées maritimes et pour la navigation fluviale.

En montant deux et même trois hélices, conduites chacune par un moteur spécial, on évite, dans de très grands bâtiments, les dimensions excessives qu'aurait une machine

unique. En outre, les évolutions sont plus faciles et une avarie de machine ne paralyse pas le bâtiment.

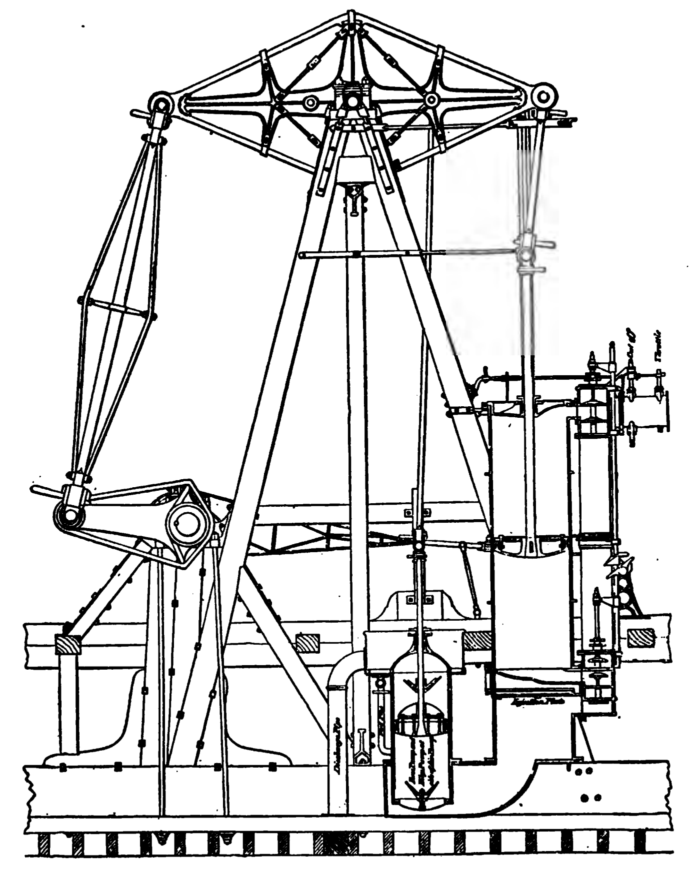


Fig. 175. — Machine à balancier supérieur d'un bateau de rivière américain; cylindre unique, distribution par soupapes. Ces machines, d'un type ancien, se trouvent encore aujourd'hui en service sans modifications essentielles.

La commande directe de l'arbre des roues exige une machine à marche lente. Le *balancier supérieur* est depuis

longtemps en usage aux États-Unis (fig. 175). Cette grande masse, oscillant au-dessus des ponts, donne aux bateaux des rivières américaines une curieuse physionomie. Le cylindre, vertical et à longue course, est souvent unique. Pour les grandes puissances, on fait usage de deux cylindres avec détente de Woolf.

Pour la navigation maritime, les anciennes machines avaient des *balanciers inférieurs*, placés de part et d'autre du cylindre vertical, et commandés par des *bielles en retour* (voir fig. 9).

On s'est bientôt débarrassé de l'attirail lourd et encombrant de ces balanciers, pour appliquer la connexion directe. Mais, en conservant la position verticale des cylindres, on était gêné par le manque de hauteur disponible sous l'arbre des roues : d'une part, on était conduit à donner aux cylindres de grands diamètres avec de faibles courses, ce qui est une mauvaise proportion, et, d'autre part, à raccourcir beaucoup trop les bielles, dont la longueur descendait presque à trois fois le rayon de la manivelle. Diverses dispositions ont été imaginées pour allonger la bielle en abaissant l'articulation de la petite tête ; l'une d'elles consiste à conjuguer deux cylindres, dont les tiges de piston commandent une grande traverse triangulaire. Certains constructeurs ont transporté l'articulation de la petite tête de bielle à une hauteur suffisante au-dessus de l'arbre ; la tige est alors reliée à un cadre qui laisse le passage de l'arbre et de la manivelle, ou l'on emploie plusieurs tiges. Telle est l'ancienne disposition de la *machine à clocher*.

Avec les *cylindres oscillants* (fig. 176), la tige du piston s'articule directement sur le tourillon de la manivelle, et le cylindre oscille sur deux tourillons creux : l'un sert à l'arrivée et l'autre à l'échappement de la vapeur : des garnitures s'oppposent aux fuites. Un renvoi spécial commande le tiroir, porté par le cylindre oscillant.

Dans les constructions récentes de bateaux à roues, les cylindres sont souvent inclinés ou même horizontaux, dis-

position qui se prête à l'emploi d'une roue unique à l'arrière, commode pour la navigation fluviale.

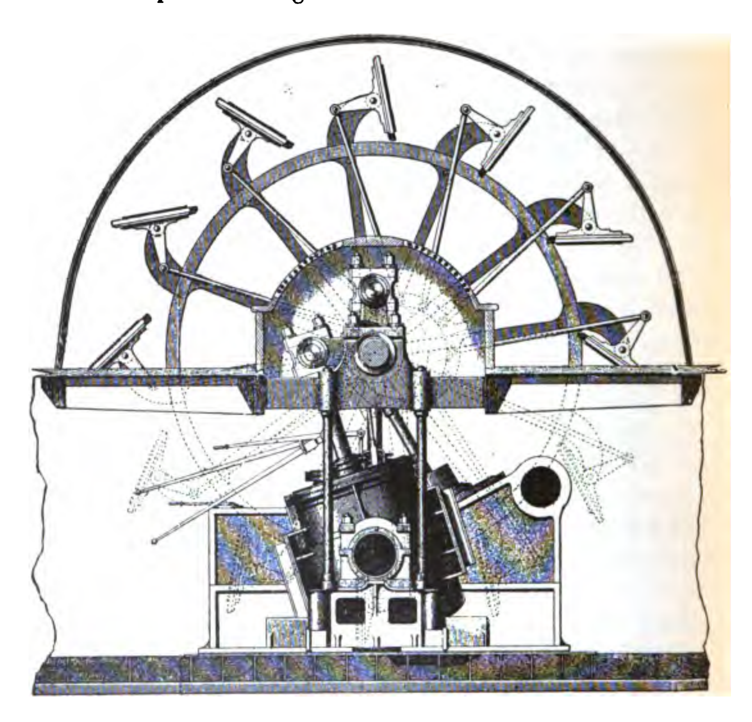


Fig. 176. — Machine à cylindres oscillants, construits par J. et G. Thompson à Glasgow, pour bateau à roues ; coupe longitudinale (Steamer « Iona » ; deux cylindres de 1,17 m sur 1,22 m ; nombre de tours par minute, 42).

Pour la commande des arbres d'hélice, la disposition pilon, à connexion directe, est de beaucoup la meilleure. Toutefois, sur les navires de guerre, on a longtemps préféré la disposition horizontale, permettant de mieux abriter les moteurs, placés au-dessous de la ligne de flottaison; mais dans les constructions récentes des marines militaires, on fait de plus en plus usage de la machine

pilon, de hauteur suffisamment réduite pour être recou-

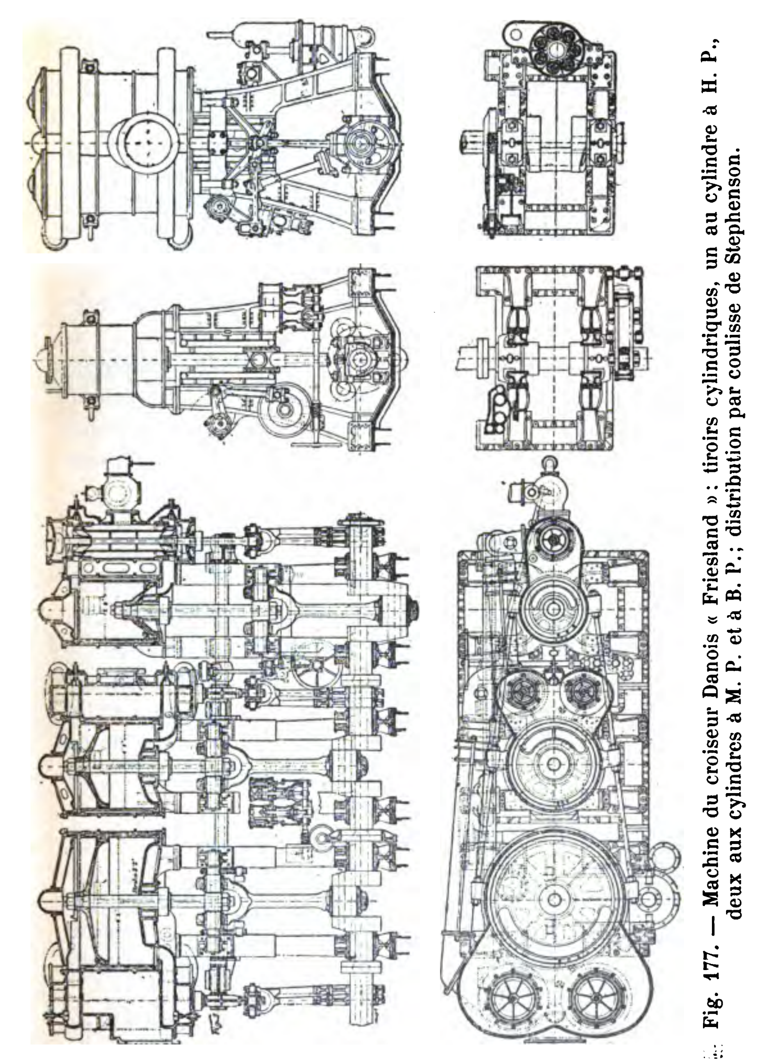


Fig. 177. — Machine du croiseur Danois « Friesland » : tiroirs cylindriques, un au cylindre à H. P., deux aux cylindres à M. P. et à B. P.; distribution par coulisse de Stephenson.

verte par des ponts cuirassés. La multiplicité des hélices

permet d'ailleurs l'emploi de moteurs de dimensions réduites.

En exceptant de très petits appareils, les machines marines sont presque toutes à triple expansion, avec des pressions initiales qui dépassent parfois 14 kg par cm². La machine la plus simple a trois cylindres et trois manivelles (fig. 177). Pour éviter un diamètre excessif de cylindre, et surtout pour équilibrer autant que possible les pièces à mouvement alternatif, on fait souvent usage de quatre manivelles calées suivant des angles convenables (disposition Yarrow-Schlick-Tweedy), en dédoublant le dernier cylindre.

Pour les machines de très grands paquebots, le montage des cylindres en tandem a été souvent adopté. On semble moins l'employer dans les constructions récentes, au moins pour les appareils n'ayant pas une puissance exceptionnelle.

La quadruple expansion est encore assez rare.

La distribution des machines marines se fait toujours par tiroirs, de préférence cylindriques; toutefois on conserve, sur le dernier cylindre, les tiroirs plans, fréquemment considérés comme plus étanches. Afin d'obtenir des sections de passage suffisantes, on est conduit à monter sur les grands cylindres deux et même plusieurs tiroirs plans ou cylindriques. Une distribution à changement de marche est nécessaire; celle de Marshall est commode pour la commande des tiroirs placés latéralement.

Les pompes de condenseur sont actionnées soit par le moteur principal, soit par un moteur auxiliaire.

Les vitesses de rotation sont de 80 tours environ par minute pour les hélices des grands paquebots et des bateaux de charge ; de 120 et 150 pour certains paquebots, et enfin de 300 et 400 pour les torpilleurs.

Le poids des machines (sans les chaudières), par cheval indiqué, peut être estimé en moyenne à 93 kg pour les paquebots et les bateaux de charge de construction récente,

à 33 kg pour les grands bateaux de guerre, et à 8 ou 10 kg pour les torpilleurs[1].

Avec la disposition horizontale, anciennement employée pour la commande d'une hélice unique, la place était insuf-

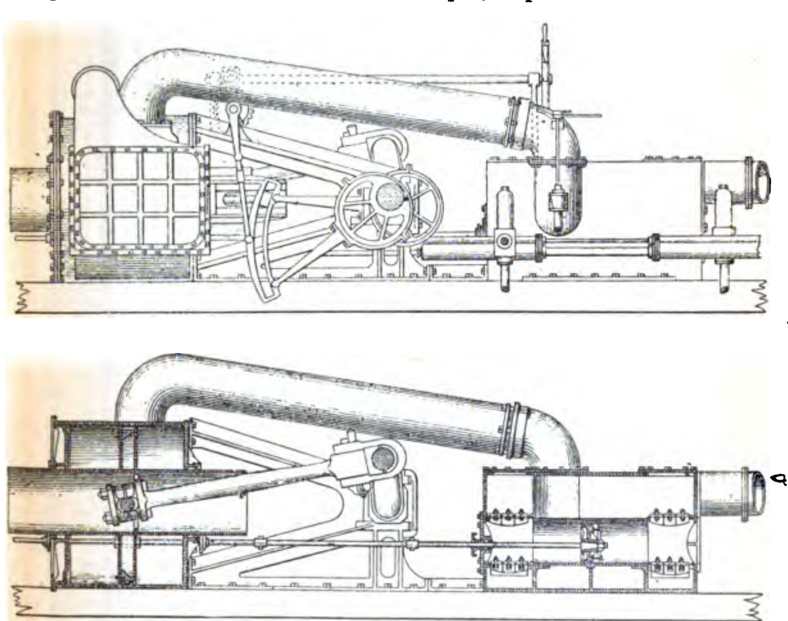


Fig. 178. — Machine à fourreau de Penn, pour l' « Arrogant » (deux cylindres de 1,400 m sur 914 mm).

fisante pour loger une machine ordinaire. La disposition *à fourreau* (fig. 178), longtemps employée par la marine britannique, reporte l'articulation de la bielle sur le piston même, au milieu d'une grosse tige creuse ou d'un *fourreau*, guidé par deux presse-étoupes, et assez large pour permettre l'oscillation de la bielle. En France, on a donné la préférence

[1] D'après M. Berlin, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, année 1899, p. 1428.

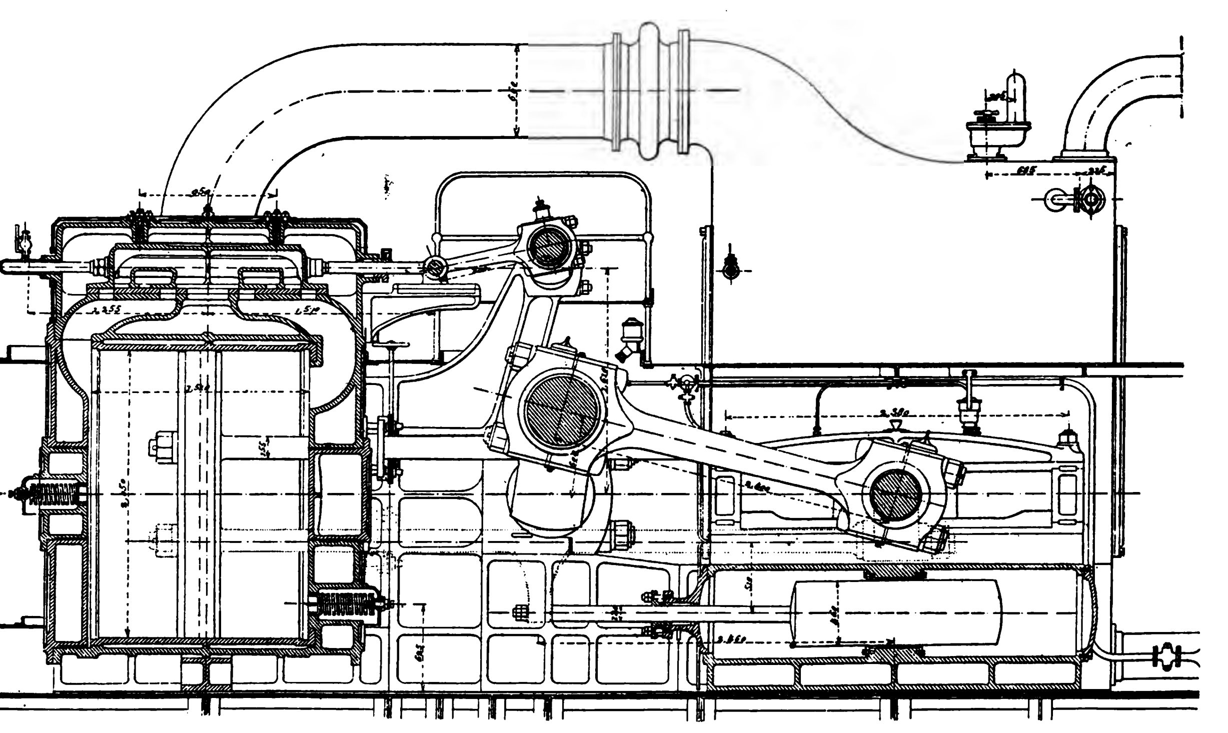


Fig. 179. — Machine à bielle renversée du « Fulminant », construite au Creusot en 1877, compound à trois cylindres du système Dupuy de Lhôme ; coupe verticale par l'axe d'un des cylindres à basse pression. Le tiroir, à double orifice et à compensateur, est commandé par la manivelle d'un arbre auxiliaire, relié par engrenages à l'arbre moteur.

à la machine *à bielle en retour* ou *renversée* (fig. 179) : la tête de piston, qui porte l'articulation de la petite tête de bielle, est transportée du côté de l'arbre opposé au cylindre ; elle est rattachée au piston par deux longues tiges, disposées de manière à éviter l'arbre et ses coudes. C'est une disposition également abandonnée depuis longtemps.

Dans les bâtiments à deux hélices, on ménage plus facilement, entre les axes des deux lignes d'arbres, les emplacements nécessaires pour deux machines horizontales ou plutôt légèrement inclinées (fig. 180).

87. Applications diverses. — On dresserait une longue liste des applications diverses de la puissance motrice de la vapeur, autres que celles qui viennent d'être examinées. Parmi les plus importantes, on peut citer le *marteau-pilon*, où la vapeur soulève simplement une masse pour la laisser retomber, quand le marteau est à simple effet. Dans le marteau à double effet, on ajoute au poids de la masse tombante la pression de la vapeur au-dessus du piston.

Le cylindre des petits appareils est porté par un jambage en fonte. Il y a deux jambages, en fonte ou en tôle, pour supporter le cylindre des grands marteaux.

Les organes de distribution, commandés à la main, doivent se manœuvrer aisément ; aussi fait-on usage de soupapes à double siège ou de tiroirs cylindriques. Pour les petits marteaux, la commande de la distribution est quelquefois automatique. Il importe que le mécanisme automatique n'admette pas la vapeur, pour relever le piston, avant que la masse frappante n'ait bien donné son coup.

La vapeur travaille seulement à pleine pression dans ces appareils, et avec l'inconvénient d'un vaste espace libre au-dessous du piston, correspondant à l'épaisseur de la pièce forgée. Si le pilon est à double effet, il y a aussi un grand espace libre au-dessus du piston quand on ne l'élève pas de toute sa course. Pour économiser la vapeur, on a construit des marteaux à double effet du type Woolf,

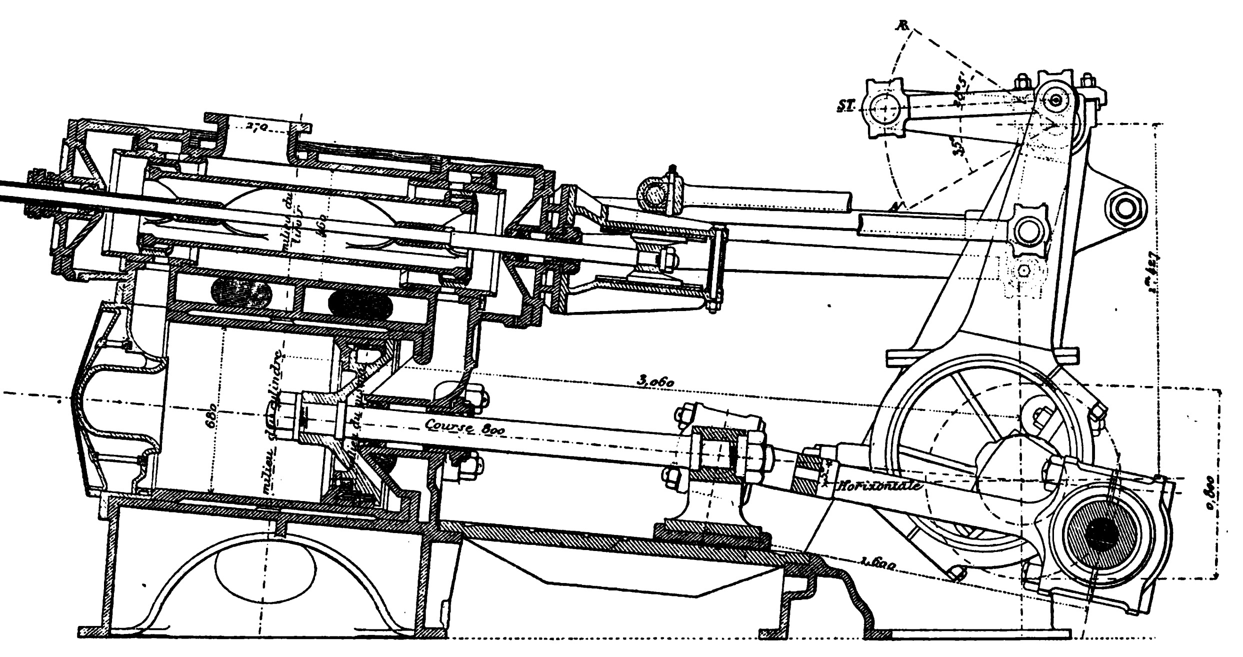


Fig. 180. — Machine du « Presidente Errazuriz » (bâtiment à deux hélices) ; coupe transversale par l'axe du petit cylindre ; distribution Marshall.

où la vapeur qui a soulevé le piston agit pendant la descente sur un piston supérieur de plus grand diamètre.

88. Machines rotatives. — Les machines rotatives, que l'imagination de nombreux inventeurs a produites, sous des formes indéfiniment variées, en apparence du moins, forment une classe de moteurs peu intéressants en théorie et en pratique. En théorie, le travail de la vapeur reste exactement le même dans une machine rotative et dans une machine à piston ; la disposition cinématique n'est d'ailleurs pas plus simple, et Reuleaux[1] a montré que souvent elle possédait en principe la même chaîne d'organes. En pratique, la capacité variable, qui reçoit la vapeur, comporte des pièces frottantes nombreuses ; il est bien plus difficile de les tenir étanches que les simples pistons dans des cylindres. L'avantage des pièces enfermées, peu encombrantes, et à peu près équilibrées, se retrouve dans certains types de moteurs à pistons ordinaires, à simple effet.

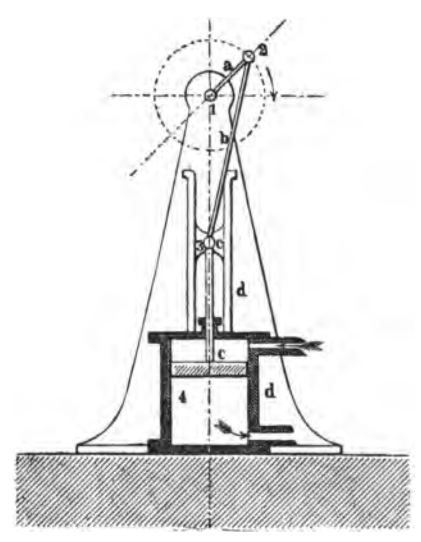


Fig. 181. — Transmission usuelle par bielle et manivelle, d'après Reuleaux.

a, manivelle ; — b, bielle ; — c, piston ; — d, lien fixe ; — trois articulations, 1, 2 et 3, et deux pièces coulissantes, c et d.

Dans une machine rotative, une chambre de capacité

[1] Reuleaux, Cinématique, traduction par Debize.

variable est formée par des parois, les unes fixes, les autres mobiles. Les parois fixes sont percées d'ouvertures pour l'arrivée et pour le départ de la vapeur. Pendant la rotation de l'appareil, dans certaines positions des pièces, la chambre communique avec l'orifice d'arrivée et la vapeur y pénètre : c'est la période d'*admission* ; durant cette période,

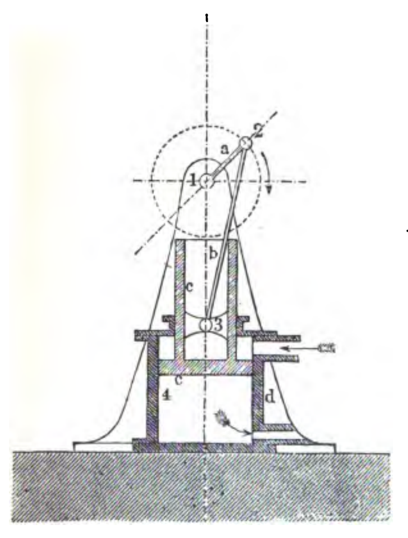


Fig. 182. — Machine à fourreau ; elle ne diffère de la transmission usuelle que par la disposition des deux pièces coulissantes, c et d (d'après Reuleaux).

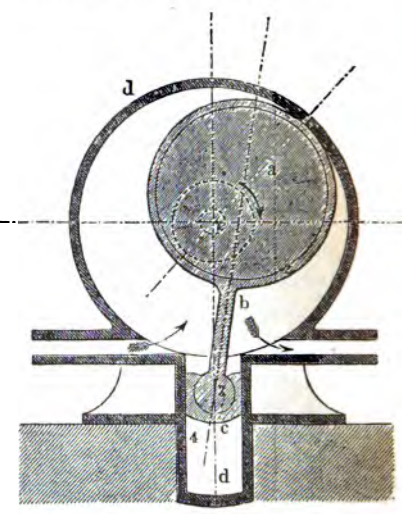


Fig. 183. — Pompe de Pattison ; la manivelle a est de la variété *excentrique ;* elle reste tangente à la surface cylindrique du lien fixe d (d'après Reuleaux).

la capacité de la chambre augmente ; toutefois, au début même, la capacité peut diminuer jusqu'à sa plus petite valeur, qui constitue l'espace libre ; il se produit alors une *admission anticipée.* Pendant la communication avec l'orifice d'échappement, la capacité va en diminuant, à moins qu'au début elle n'augmente encore, donnant ainsi un *échappement anticipe.* Enfin, les périodes intermédiaires de *détente* et de

compression se produisent lors de l'augmentation et de la diminution de la capacité ne communiquant avec aucun des orifices.

Plusieurs chambres pareilles peuvent être disposées autour d'un axe ou de plusieurs axes de rotation.

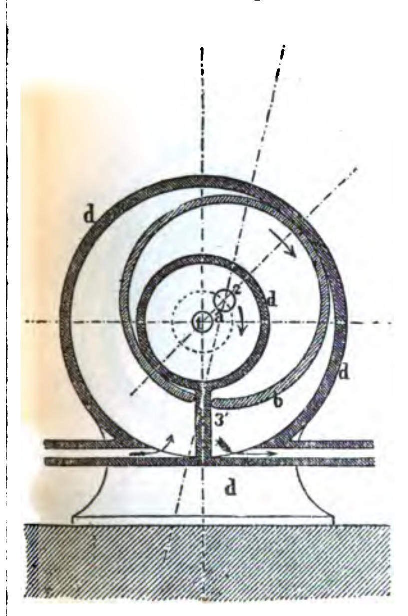


Fig. 184. — Machine à vapeur de Lamb; la pièce coulissante c fait défaut, et l'équivalent b de la bielle fait joint sur la cloison 3' du lien fixe d. qui forme la capsule (d'après Reuleaux).

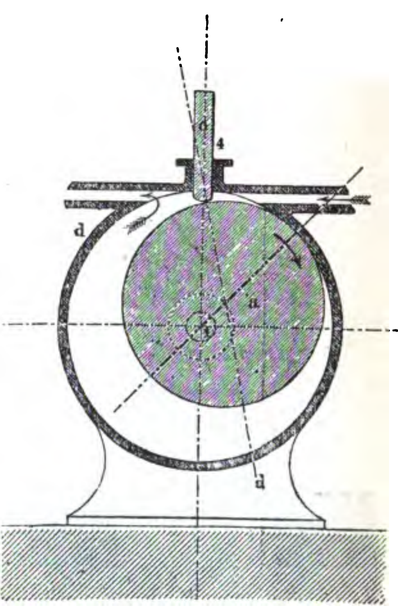


Fig. 185. — Machines de Yule et de Hall ; la glissière c reste appuyée contre l'excentrique a ; le lien b fait défaut (d'après Reuleaux).

D'après la classification méthodique de Reuleaux, les machines à vapeur rotatives, ainsi que les pompes et les ventilateurs présentant les mêmes dispositions cinématiques, se ramènent à deux grandes catégories : les *capsulismes* qui dérivent de la transmission par bielle et manivelle, et ceux qui forment des engrenages.

La transmission, si souvent employée, par bielle et manivelle, comporte quatre organes essentiels, la *manivelle* a (fig. 181), la *bielle* b, le *piston* c, et le *pont* d, constitué par le cylindre, les glissières et le bâti ; les liens s'articulent l'un sur l'autre en 1, 2 et 3 et le lien c coulissé dans le lien fixe d, en 4.

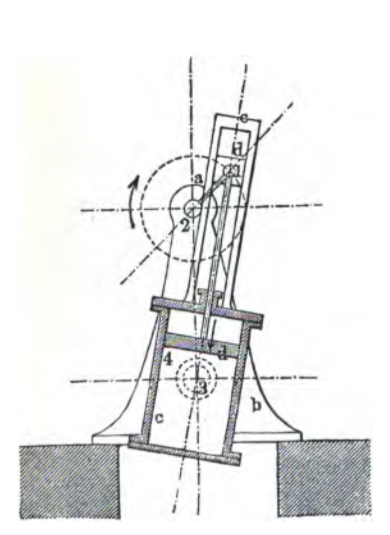


Fig. 186. — Machine oscillante ; le lien b étant fixe, les pièces coulissantes c et d oscillent autour de l'articulation fixe 3 (d'après Reuleaux).

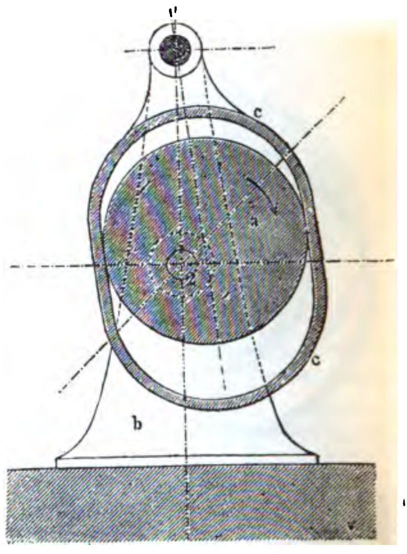


Fig. 187. — Machine de Simpson et Shipton ; le lien b est fixe, comme dans la machine oscillante, et le membre d est supprimé ; l'excentrique a reste en contact avec les parois du membre c oscillant autour de l'articulation 3. Un mécanisme spécial distribue la vapeur (d'après Reuleaux).

Les figures 182 à 185 (d'après les croquis de Reuleaux) représentent des mécanismes dérivés directement de la transmission usuelle de la figure 181.

La figure 182 est la machine à fourreau ; la figure 183 est une pompe, due à Pattison : il existe une communication

entre l'ouverture d'aspiration et de refoulement au moment du passage de la manivelle a par sa position la plus basse. Dans la machine à vapeur de Lamb (fig. 184), la pièce coulissante c fait défaut, et c'est la pièce b, dérivée de la bielle, qui coulisse sur la cloison 3' du pont d.

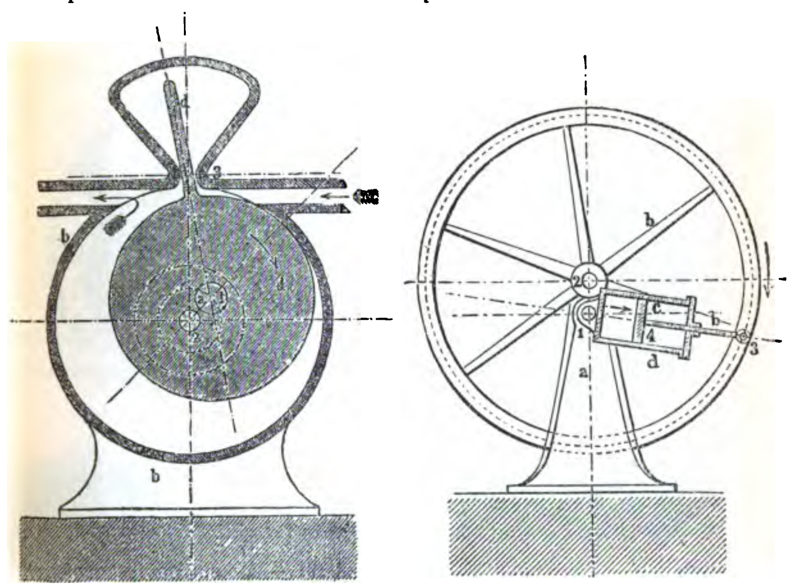


Fig. 188. — Ventilateur Wedding; le lien b est fixe; le membre d se meut au contact de b; le membre c est supprimé (d'après Reuleaux).

Fig. 189. — Moteur (d'après Reuleaux); le membre a est fixe, et le membre c est un piston jouant dans le cylindre d, qui tourne autour du tourillon 1 : cette rotation produit la distribution de vapeur.

La figure 185 représente les machines à vapeur de Yule et de Hall.

Ces différents mécanismes constituent des machines les unes à simple, les autres à double effet.

Dans la combinaison de quatre pièces, qui constitue le mécanisme de la figure 181, on peut immobiliser le lien b,

en conservant les articulations 1, 2 et 3 et le mouvement de coulisse de c et de d : la coulisse est alors oscillante au lieu de rester fixe. Cette combinaison est réalisée dans la machine oscillante (fig. 186). La machine de Simpson et Shipton (fig. 187) réalise cette combinaison, avec suppression du

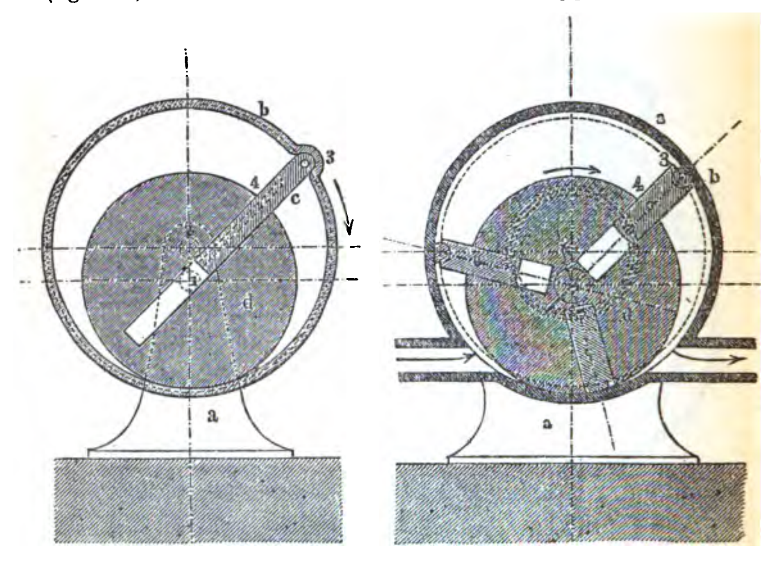


Fig. 190. — Moteur (d'après Reuleaux) ; le membre a est fixe, l'anneau b est l'équivalent de la bielle, et le piston c coulisse dans la glissière d; la vapeur pénètre par des canaux ménagés dans le tourillon 1 et dans le piston c.

Fig. 191. — Moteur Davies; trois mécanismes y sont réunis; les trois pistons c y jouent à l'intérieur du lien fixe a, auquel ils sont rattachés par le lien b (en pointillé), articulé en 2 au centre de la cavité cylindrique (d'après Reuleaux).

membre d ; un mécanisme de distribution permet les entrées et les sorties de la vapeur. Le membre b est encore immobile dans le ventilateur Wedding (fig. 188).

En immobilisant le membre a, qui correspond à la manivelle, on réalise une nouvelle catégorie de mécanismes. Les membres mobiles d, b, et c ont chacun un mouvement de

rotation et, de plus, le coulisseau c oscille dans la coulisse d. Dans les nombreuses machines rotatives qui se ramènent à cette combinaison, on trouve utilisé comme piston chacun des trois membres mobiles. Les figures 189 à 191 reproduisent quelques-uns des exemples donnés par Reuleaux.

Dans le moteur de la figure 189, la distribution de vapeur est produite par la rotation du tourillon 1 ; à première vue, on reconnaîtrait difficilement que le volant de cette machine est en principe l'équivalent de la bielle ordinaire. Dans le moteur de la figure 190, la vapeur pénètre par le tourillon creux 1 et par un conduit ménagé dans le piston c. La machine Davies (fig. 191) réunit trois mécanismes. La disposition de la figure 192 comporte deux mécanismes où le membre d est employé comme piston.

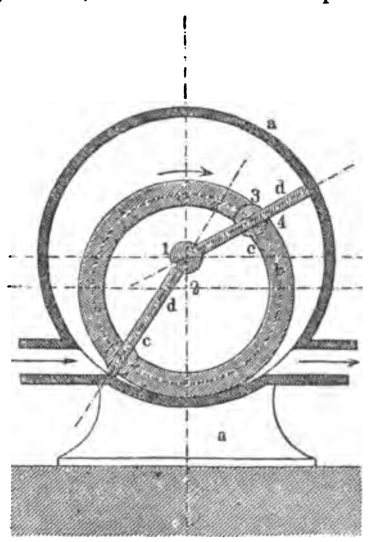


Fig. 192. — Moteur (d'après Reuleaux) ; deux membres d fonctionnent comme pistons, coulissant dans les pièces c, dont l'axe 3 tourne dans l'anneau b ; b tourne autour de 2.

Le fonctionnement des *capsulismes à roues*, qui engrènent entre elles, se comprend à première vue. Ces appareils servent le plus souvent de pompes et de ventilateurs. La machine Behrens (fig. 193) se rattache à cette catégorie.

La figure 193 représente diverses positions successives des pièces tournantes de la machine Behrens. On peut répéter à ce sujet ce que disait le professeur Callon en 1875 : « Elle est indiquée, à titre d'exemple, entre les dispositions

assez nombreuses qui ont été successivement proposées pour résoudre le problème des machines rotatives, mais

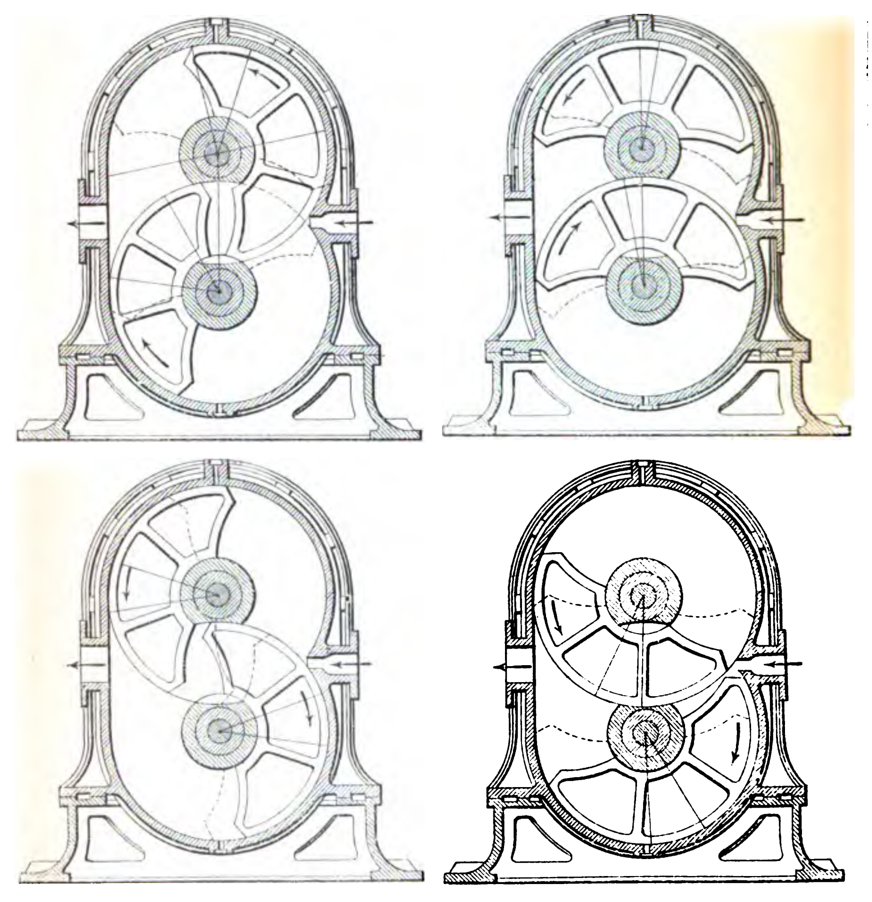


Fig. 193. — Machine rotative Behrens : positions diverses des deux pièces mobiles, qui tournent à l'intérieur d'une enveloppe et sur des manchons fixes échancrés (d'après Callon, Cours de machines).

dont aucune jusqu'ici n'est devenue d'un usage courant. »
Les deux pièces tournantes doivent former un joint étanche

contre l'enveloppe extérieure et contre les manchons échancrés placés à l'intérieur; en outre, le joint étanche doit exister contre les fonds plats, aux deux extrémités. A la simple inspection de la figure, on voit que ces conditions sont difficilement réalisables, et que les fuites peuvent être importantes. Les diverses positions successives montrent que la vapeur travaille à pleine admission et sans détente, autre que celle qui peut résulter des laminages.

CHAPITRE X

CONDENSATION

89. Divers modes de condensation. — La condensation réduit la pression de la vapeur à l'échappement des machines. Elle était indispensable dans les premiers appareils, où tout le travail résultait de l'abaissement de la pression au-dessous de la pression atmosphérique, sous laquelle était produite la vapeur. On a commencé par refroidir la vapeur, qu'on voulait condenser, dans le cylindre même où elle travaillait, d'abord par arrosage de l'extérieur du cylindre, puis par injection d'eau à l'intérieur. Mais on a reconnu que la condensation dans un récipient séparé du cylindre, où la vapeur s'écoule au moment voulu, produisait le même abaissement de pression. On évite ainsi un refroidissement exagéré des parois du cylindre moteur[1]. Le condenseur séparé fonctionne par *injection*, ou *mélange*, quand on y liquéfie la vapeur au contact direct de l'eau froide, tandis que le *condenseur à surface* est extérieurement rafraîchi par l'eau.

Le condenseur à surface est plus coûteux que le condenseur par mélange : on l'emploie lorsque l'eau disponible ne convient pas pour l'alimentation des chaudières, principalement sur mer ou au bord de la mer : il donne en effet de l'eau distillée qui sert indéfiniment, sauf une certaine perte. En

[1] Il faut remarquer que le condenseur séparé n'évite pas complètement le refroidissement des parois des cylindres, comme le prouve l'action défavorable de ces parois, exposée au § 32; mais le refroidissement est moindre qu'avec l'envoi d'eau dans le cylindre, qui d'ailleurs n'était possible que grâce à la lenteur de la marche.

outre, il faut la débarrasser le mieux possible des matières grasses qui viennent du cylindre et qui sont nuisibles dans les chaudières.

Dans les grandes installations de machines, on n'hésite guère à installer la condensation, qui réduit la dépense de combustible. Pour les petits moteurs, l'avantage est moins évident. Par exemple une machine demi-fixe, sans condensation, développera 40 chevaux, en brûlant en marche normale 2 kg de houille par cheval-heure. L'installation d'un condenseur, en supposant qu'on dispose facilement d'eau en quantité suffisante, réduira cette consommation à 1,7 kg; si la machine fonctionne 3 000 heures par an, c'est une économie de 36 t de houille ou de 720 fr à 20 fr la tonne; il faut déduire les frais d'entretien du condenseur, qu'on peut estimer à 120 fr par an. La dépense d'installation du condenseur peut être évaluée à 2 000 francs.

Au lieu d'ajouter un condenseur, on peut munir la machine d'un réchauffeur d'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement; s'il est bien disposé, ce réchauffeur portera la température de l'eau à 90 ou 95° à son entrée dans la chaudière, et la dépense de houille descendra à 1,8 kg par cheval-heure, de sorte que l'avantage du réchauffeur est presque aussi grand.

En outre, dans certaines chaudières de machines demi-fixes, la vapeur d'échappement est envoyée dans la cheminée pour produire un tirage suffisant, de sorte que la condensation pourrait rendre difficile le maintien de la pression, malgré la réduction de la consommation. Le réchauffage d'eau d'alimentation laisse disponible pour le tirage une partie de la vapeur d'échappement.

Le condenseur s'impose lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la puissance du moteur. Le moteur de 40 chevaux pris comme exemple arrivera à en développer près de 50 sans brûler beaucoup plus, grâce à la condensation. Tandis que si l'on veut forcer la puissance d'un moteur de ce genre au delà d'une limite convenable, on risque d'augmenter énor-

mément la consommation de la houille par cheval-heure, parce que la chaudière est surmenée.

90. Condensation par mélange. — Le *condenseur à injection* ou *à mélange* reçoit la vapeur d'échappement et une injection d'eau finement divisée, qui maintient une température relativement basse, souvent de 30 à 40°; la pression correspondante de la vapeur saturée est de 43 à 75 g par cm², pression mesurée par une colonne de mercure haute de 32 à 55 mm; la pression réelle dans le condenseur est plus grande, parce qu'il contient en outre de l'air; cet air y pénètre surtout avec l'eau d'injection, qui le renferme en dissolution et le dégage, en s'échauffant sous une faible pression. D'après la *loi de Dalton,* la pression dans le condenseur est la somme des pressions qu'auraient l'air seul et la vapeur saturée à la température qui règne dans l'appareil.

Il faut extraire du condenseur l'eau et l'air qui y pénètrent ainsi continuellement : c'est le rôle d'une pompe dite *pompe à air,* munie de clapets d'*aspiration*, s'ouvrant du condenseur dans la pompe, et de clapets de *refoulement*, s'ouvrant au dehors.

On compte en moyenne de 20 à 30 litres d'eau pour condenser un kilogramme de vapeur : cette quantité est variable suivant la température de l'eau disponible, et suivant la température qu'on veut maintenir dans le condenseur[1].

Le calcul de la proportion d'eau nécessaire est utile surtout pour assurer l'alimentation du condenseur : en marche, on règle la quantité d'eau admise, sans la connaître exactement, par la manœuvre d'un robinet d'injection, de manière à maintenir une température et une pression convenables.

[1] On estime la proportion d'eau nécessaire pour maintenir une température donnée en comptant que le condenseur doit absorber au plus 600 calories par kg de valeur condensée; si l'eau disponible est à la température de 15°, et si on en emploie 30 kg par chaque kg de vapeur, chaque kilogramme d'eau de condensation prendra 20 calories, et, par suite, s'échauffera de 15° à 35°.

La pompe à air doit extraire, avec chaque kilogramme de vapeur condensée, les 20 à 30 kilogrammes d'eau de condensation et l'air qui a pénétré dans le condenseur. On estime que l'air dissous dans l'eau occuperait en moyenne, sous la pression atmosphérique, le vingtième du volume de l'eau. Dans le condenseur, cet air se dégage par l'effet de la réduction de la pression et de l'élévation de la température.

En outre, il peut pénétrer dans le condenseur un peu d'air provenant de l'eau d'alimentation de la chaudière et des fuites de la machine ou du condenseur même : la pompe à air doit également l'extraire. Souvent on choisit, pour le volume de la pompe à air, la valeur assez large de 100 litres par kilogramme de vapeur à condenser : cela veut dire que le piston de cette pompe engendre un volume de 100 l par chaque kg de vapeur condensée[1]. La quantité de vapeur peut d'ailleurs varier quelque peu sans inconvénient. Les 100 l de la pompe recevront, pendant l'aspiration, dans la marche à 30 kg d'eau pour 1 kg de vapeur, 31 l d'eau et 69 l d'air raréfié.

En augmentant la proportion d'eau injectée dans le condenseur, on abaisse la température finale et, par suite, la tension de la vapeur, de sorte qu'il semble qu'il y aurait avantage à employer le plus d'eau possible pour réduire au minimum la pression résistante de la vapeur d'échappement; mais comme l'eau d'injection apporte de l'air, qui se dégage dans le condenseur, et dont la pression s'ajoute à celle de la vapeur, au delà d'une certaine quantité d'eau, la pression totale, qui est seule à considérer, vient à augmenter. Cette quantité limite dépend de la température de l'eau disponible et de la proportion d'air qu'elle contient;

[1] Par exemple, si une machine envoie au condenseur 1 kg de vapeur par tour, et si la pompe à air, commandée par cette machine, et fonctionnant à simple effet, donne alors une course simple d'aspiration et une course simple de refoulement, le volume engendré par son piston devra être de 100 l, ce qui correspond à un diamètre de 357 mm avec une course d'un mètre.

en général, il n'y a pas intérêt à dépasser le débit de 30 kg d'eau par kg de vapeur, et on peut même souvent se tenir bien en dessous[1].

La pompe à air n'aspire l'air et l'eau dans le condenseur que par intermittences, tandis que l'afflux est presque continu : il en résulte des variations périodiques de la pression au condenseur, variations qui ne doivent pas dépasser une limite fixée. Un calcul assez simple apprend que la capacité du condenseur n'a pas besoin d'être bien grande pour que ces variations soient minimes.

Il est également facile de calculer le *travail utile* demandé à la pompe à air pour une excursion aller et retour de son piston. Ce travail peut s'élever aux 15 millièmes du travail indiqué produit par la vapeur, mais les frottements, les chocs du liquide, augmentent ce travail, et on compte que le service du condenseur dépense 30 à 35 millièmes de la puissance indiquée d'un moteur.

91. Condenseurs à mélange. — Le condenseur est une boîte en fonte, soumise extérieurement à la pression de l'atmosphère ; des nervures en consolident les faces planes. La forme n'a guère d'importance pour le fonctionnement. Les joints doivent être peu nombreux, car ils peuvent laisser rentrer l'air, à moins qu'ils ne soient noyés dans une bâche pleine d'eau. Les condenseurs portent des plateaux de visite et des robinets de vidange.

L'arrivée d'eau est généralement continue : elle peut être aspirée sur une hauteur de quelques mètres. L'amorçage peut alors se faire au moyen d'un jet de vapeur qui chasse l'air puis fait le vide en se condensant.

En cas de ralentissement de la machine, si l'afflux d'eau reste constant, elle peut refluer jusqu'au cylindre : pour éviter ce danger, on munit quelquefois le condenseur d'un

[1] D'autre part, l'eau de condensation sert souvent à alimenter les chaudières ; à ce point de vue, il y a intérêt à ce qu'elle ne soit pas trop froide.

flotteur, qui ouvre une rentrée d'air quand le niveau de l'eau s'y élève trop haut.

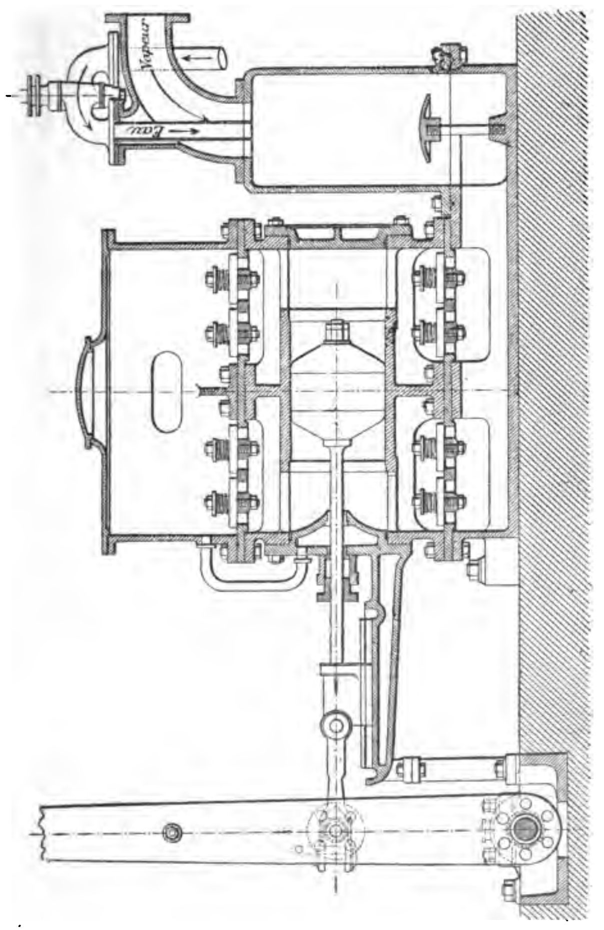


Fig. 194. — Condenseur par mélange avec pompe à air à piston plein, à double effet; l'ouverture des clapets d'aspiration laisse entrer l'eau, puis l'air dans la pompe, qui refoule l'air, puis l'eau dans la bâche, placée à la partie supérieure.

Parfois un moteur auxiliaire commande la pompe à air d'un condenseur, qui peut servir à plusieurs machines différentes : il est alors possible d'en faire varier la vitesse

suivant l'afflux de vapeur et la température de l'eau de con-

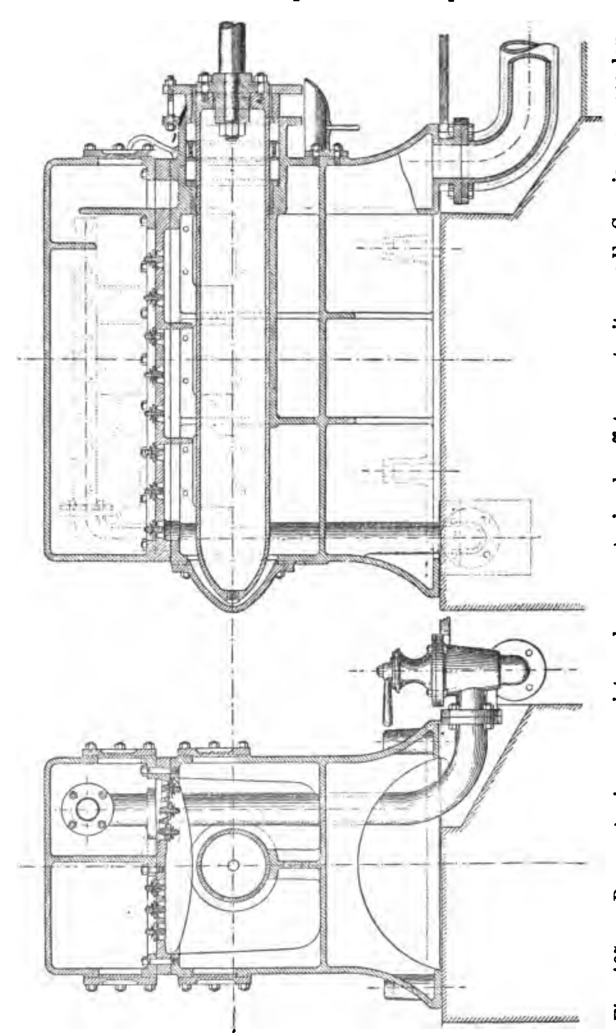
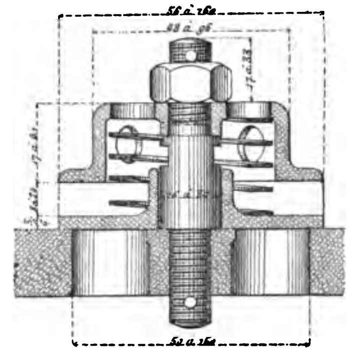


Fig. 195. — Pompe à air, avec piston plongeur, à simple effet, construite par E. Garnier; coupes longitudinale et transversale; la coupe transversale montre le condenseur proprement dit, à la partie supérieure et à droite; l'eau d'injection y pénètre par un tuyau perforé, et le dessin montre le robinet de réglage. La pompe est en dessous; le piston plongeur est commandé en tandem par une contre-tige du piston moteur. La coupe longitudinale et la coupe transversale (à gauche, à la partie supérieure) montrent la bâche de dégagement de l'eau et de l'air.

densation. Les machines isolées, de puissance moyenne, commandent ordinairement leur pompe à air; quand le

cylindre est horizontal, le piston de cette pompe est souvent attelé en tandem à la contre-tige du piston ; d'autres fois, le condenseur est placé en contre-bas ; la pompe à air, horizontale ou verticale, est menée par un balancier ou une équerre de renvoi. Elle est noyée dans le condenseur, ou lui est accolée. Le piston ordinaire plein (fig. 194), se combine bien avec la disposition horizontale à double effet.

Le piston plongeur (fig. 195), à simple effet, est aussi fort usité. Il permet de plus grandes vitesses : pour la bonne marche des pompes, il faut que l'eau puisse suivre le piston; la force qui pousse l'eau dans le corps de pompe du condenseur pendant l'aspiration est relativement faible : l'accélération qu'elle est capable de prendre ne peut être grande. Ce motif limite la vitesse de marche des pistons ordinaires, tandis que le plongeur peut, sans inconvénient, marcher rapidement, pourvu que les sections de passage de l'eau, à travers les clapets ou les soupapes, soient assez grandes.



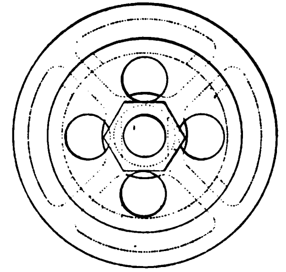


Fig. 196. — Soupape pour pompe à air de condenseur (type de la Compagnie générale Transatlantique). Un chapeau en bronze maintenu par un écrou, vissé sur un goujon fixé sur le siège, contient le petit ressort qui appuie sur le disque en bronze formant soupape.

Le volume de l'espace libre de la pompe, toujours plein d'eau, est indifférent. Les clapets d'aspiration doivent être

placés au fond du condenseur, pour que le poids de l'eau s'ajoute à la faible pression qui la pousse. Il convient que ces organes soient légers; les clapets à charnière se mattent vite par les chocs. Le caoutchouc risque de s'altérer à la chaleur. La figure 196 représente un type assez simple de petite soupape métallique : on emploie ces soupapes en nombre aussi grand qu'il est nécessaire.

En donnant au piston ordinaire d'une pompe, à double effet, une épaisseur presque égale à la course, on peut supprimer les clapets d'aspiration ; l'eau et l'air y pénètrent par des lumières percées au milieu du cylindre et découvertes par le piston en fin de course.

Des appareils indicateurs simples permettent de suivre la marche du condenseur. Le plus commode de ces appareils est un *baromètre,* dont la hauteur peut être réduite, puisqu'il n'indique que des pressions bien inférieures à celles de l'atmosphère.

L'*indicateur de vide*, souvent employé, donne la différence entre la pression atmosphérique et la pression effective dans le condenseur : il faut quelque réflexion pour en comprendre l'indication. Un *thermomètre* plongeant dans l'eau évacuée fournit un contrôle utile.

92. Appareils divers. — Dans le condenseur ordinaire, la pression de l'air s'ajoute à celle de la vapeur, qui dépend de la température entretenue ; dans le condenseur Weiss, une circulation méthodique est établie pour éviter cette augmentation de pression. L'appareil consiste en un tube vertical, que l'eau parcourt du haut en bas, en coulant sur des chicanes. La vapeur entre par le bas (fig. 197). A la partie supérieure, *une pompe à air seul* aspire l'air. L'eau s'écoule à la partie inférieure par un tube vertical, long de 10 m au moins et plongeant dans une bâche. La pression dans le condenseur est toujours le total de la pression de la vapeur, et de la pression de l'air. Mais ces deux pressions varient du bas en haut du condenseur, celle de la vapeur

décroissant tandis que celle de l'air augmente : le total est plus faible que dans le condenseur ordinaire.

Toutefois des dispositions spéciales d'une certaine complication sont nécessaires pour le bon fonctionnement de

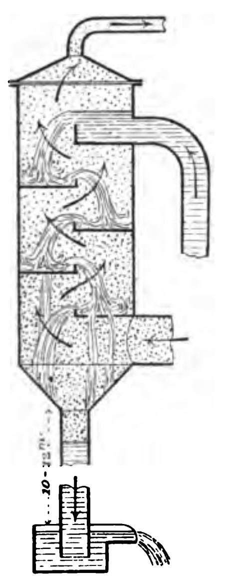


Fig. 197. — Condenseur Weiss, avec pompe à air seul.

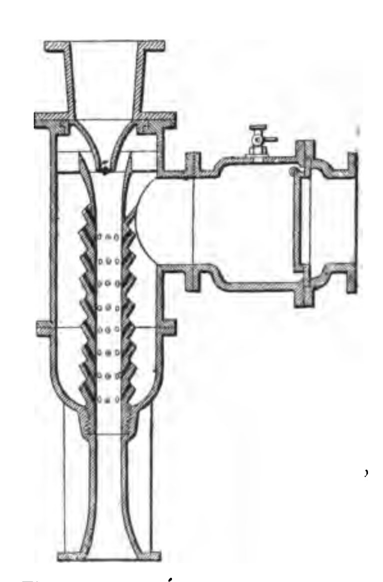


Fig. 198. — Éjecteur condenseur Kœrting : la vapeur entre à droite, en soulevant un clapet destiné à empêcher le retour accidentel d'eau au cylindre ; l'eau froide est lancée par la tuyère, à la partie supérieure de l'appareil.

cet appareil, employé surtout comme condenseur central desservant plusieurs machines.

On remplace parfois le condenseur et sa pompe à air par l'*éjecteur-condenseur* (fig. 198), analogue aux injecteurs qui alimentent les chaudières. La vapeur à condenser s'écoule dans une chambre, où une tuyère envoie de l'eau froide ; il en résulte un jet d'eau rapide, qui s'engage dans un *diver-*

gent où la vitesse se ralentit, tandis que la pression augmente. Cette augmentation est suffisante pour que l'eau soit rejetée au dehors, malgré la pression atmosphérique. Cet appareil est applicable quand on dispose d'une grande quantité d'eau en charge.

93. Rafraîchissement de l'eau de condensation. — Lorsque l'eau est rare, on peut l'employer plusieurs fois en la faisant refroidir ; le refroidissement est dû surtout à l'évaporation, et la dépense d'eau est alors presque égale à celle d'une machine à échappement dans l'atmosphère.

On peut à cet effet faire couler l'eau sur des fascines, dans des appareils encombrants, et gênants par la buée qu'ils donnent. Parfois on se contente d'un bassin avec jets d'eau finement divisée.

Des appareils plus compacts sont complètement enfermés dans une enveloppe, où un ventilateur, ou le simple tirage dû à l'échappement de l'air, entretient un courant ascendant ; la vapeur formée est entraînée dans une cheminée de dégagement.

94. Condenseur à surface. — Le condenseur à surface, construit par Hall en 1831, fut bientôt abandonné, pour être repris en 1860, puis considéré comme indispensable en mer. Les dispositions de Hall ne différaient guère de celles qui sont adoptées aujourd'hui.

La vapeur, ne se mélangeant plus avec l'eau de condensation, donne de l'eau distillée, qu'on renvoie aux chaudières et qui sert indéfiniment ; les pertes seules doivent être remplacées.

La surface condensante s'obtient à l'aide d'un grand nombre de tubes, dans lesquels circulent l'eau. Quelquefois on adopte la disposition inverse : la vapeur pénètre dans les tubes et l'eau est en dehors, comme dans le condenseur de Hall.

Sous sa forme la plus simple, le condenseur est un réci-

pient cylindrique, avec deux *plaques de tête* où s'emmanchent les tubes; mais, pour occuper moins d'espace, on lui donne des formes plus compliquées, avec des tubes plus courts : il convient alors de diriger le courant d'eau en lui faisant traverser successivement plusieurs groupes de tubes. La circulation de l'eau doit être effective dans tous les tubes pour que leur surface soit utilisée. On doit aussi empêcher que l'air, occasionnellement dégagé par l'eau de circulation, ne puisse s'accumuler en certains points.

L'arrivée d'eau se fait parfois dans le voisinage de l'entrée de vapeur, qui se trouve immédiatement en contact avec les parois les plus froides, mais souvent en d'autres points du condenseur. Il importe d'offrir à la vapeur, qui doit pénétrer rapidement dans le condenseur, un espace vide dans le voisinage de l'entrée.

Le diamètre extérieur des tubes est d'environ 2 cm, avec une épaisseur de 1 à 1,5 mm ; ils sont en cuivre ou en laiton.

Le montage dans les plaques se fait à l'aide d'une *garniture* serrée par un presse-garniture fileté (fig. 199), portant une saillie vers l'intérieur, afin que le tube ne puisse sortir en glissant. La garniture se compose d'une tresse de chanvre ou de coton, de caoutchouc [1], de rondelles en papier, ou d'autres substances. Parfois on remplace la garniture et le presse-garniture par un bouchon creux en bois, que l'humidité fait gonfler.

Les longs tubes sont supportés par une plaque intermédiaire.

La vapeur amène des matières grasses qui recouvrent les tubes et gênent la transmission de la chaleur ; on fait disparaître ces dépôts en envoyant dans le condenseur des jets de vapeur.

La *pompe à air* subsiste avec le condenseur à surface,

[1] Le caoutchouc est attaqué par l'huile minérale qui sert au graissage des cylindres et que la vapeur entraîne.

mais les dimensions peuvent en être moindres qu'avec le condenseur à injection, puisqu'il n'y a plus à extraire que l'eau provenant de la condensation de la vapeur et l'air pénétrant par les joints. Toutefois, une pompe à air trop

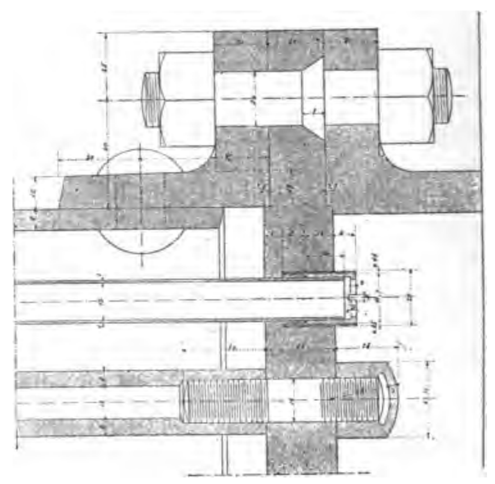


Fig. 199. — Montage d'un tube de condenseur et d'une entretoise des plaques tubulaires (construction du Creusot en 1892). La garniture assurant le joint des tubes de condenseurs se compose : 1° d'une bague en caoutchouc, de fil de coton enroulé autour du tube, ou de rondelles de papier découpées à l'emporte-pièce et superposées. Le Creusot a abandonné les rondelles en caoutchouc, qui se détériorent assez rapidement au contact des eaux grasses, et emploie indifféremment le fil de coton et les rondelles en papier; 2° d'une bague en laiton pour empêcher l'écrou fileté d'entraîner la garniture dans les filets; 3° d'un écrou fileté pour le serrage de de la garniture.

petite n'assurerait pas bien la condensation par surface : il convient qu'elle ait au moins un volume égal environ au 20e de celui du dernier cylindre de détente du moteur (à plusieurs expansions) : elle est supposée fonctionner à double effet et avoir la même marche que le moteur desservi.

Le condenseur à surface porte une *pompe de circulation*, qui fait passer dans l'appareil l'eau de refroidissement : en

mer, la pompe de circulation n'a guère de travail d'élévation à fournir, mais elle surmonte seulement les frottements. Sur les grands navires, c'est souvent une pompe centrifuge, commandée par un moteur spécial, dont on peut faire varier la vitesse.

Pour établir un condenseur, on doit déterminer la surface condensante et la quantité d'eau de circulation suivant le débit de vapeur envoyée par la machine. On veut entretenir au condenseur une température déterminée. L'eau de refroidissement ne sort pas à cette température comme dans le condenseur à injection, mais à une température inférieure, inconnue à priori.

Souvent on choisit une surface condensante de 0,2 m² par cheval[1] et un débit d'eau de circulation de 50 litres en moyenne par kilogramme de vapeur. Avec un moteur indépendant, on peut faire varier ce débit suivant les besoins, en l'augmentant quand la température de l'eau disponible s'accroît.

Le *travail absorbé par la pompe à air* se calcule comme pour le condenseur à injection : il est minime et consiste surtout à vaincre les résistances passives.

Le *travail de la pompe de circulation* se calcule d'après les formules de l'hydraulique. Dans un appareil donné, il est proportionnel au carré de la vitesse de l'eau, c'est-à-dire du débit. C'est souvent 1,5 p. 100 environ du travail indiqué. Le travail des deux pompes est, au total, à peu près égal au travail de la pompe unique du condenseur à injection.

A titre d'exemple, le condenseur d'une machine récente de la marine française a les proportions suivantes, pour un moteur à cylindres successifs de 780 — 1 150 — 1 750 mm avec 1 m de course, développant au maximum, avec les

[1] Il s'agit des condenseurs de machines marines, dont la consommation se tient aux environs de 7 kg de vapeur par cheval-heure ; d'une manière générale, l'indication de la puissance en chevaux ne donne qu'une idée incertaine de la consommation de vapeur.

appareils auxiliaires. 3 700 chevaux indiqués, à la vitesse de 124 tours par minute :

Surface réfrigérante en contact avec l'eau). 476 m², obtenue par des tubes de 16 mm de diamètre extérieur et 14 intérieur ;

Deux pompes à air verticales, à simple effet : diamètre, 590 mm ; course, 350 mm ;

Nombres de tours de l'arbre des pompes par minute, 170 — 140 — 120, pour des marches aux puissances de 3 700 — 2 500 — 1 000 chevaux ;

Pompe de circulation, centrifuge : diamètre 1,200 m ; elle débite 1 700 m³ à l'heure, à la vitesse de 170 tours par minute.

Dans l'*aéro-condenseur* Fouché, l'eau de circulation est remplacée par un courant d'air puissant, envoyé par un ventilateur sur un faisceau tubulaire qui reçoit la vapeur d'échappement : on peut ainsi obtenir la condensation, lorsque l'eau fait défaut. L'air chaud ainsi obtenu peut être utilisé au chauffage des ateliers, et, dans certaines industries, à la dessiccation des matières élaborées.

D'après M. Fouché, l'aéro-condenseur exige en moyenne 80 m³ d'air, pris à 10°, pour condenser un kilogramme de vapeur, et peut abaisser la pression à 150 g par cm² (*vide* de 65 cm de mercure). L'abaissement de la pression est moindre quand l'air n'est pas froid, ou quand on veut l'obtenir très chaud pour certaines opérations de séchage. Avec addition d'un arrosage extérieur des tubes, la quantité d'air peut être réduite.

CHAPITRE XI

PRODUCTION DE LA VAPEUR

95. Généralités. — La production de la vapeur exige beaucoup de soin et d'attention : du chauffeur dépendent l'économie de combustible, la conservation des chaudières et la sécurité.

Le *générateur* de vapeur, ou *chaudière*, est un récipient clos, soumis à l'action de la chaleur dégagée dans un foyer, et dans lequel l'eau est chauffée et vaporisée sous une pression déterminée dans chaque cas, et limitée par la *soupape de sûreté*. Un appareil *alimentaire* remplace l'eau sortie du générateur à l'état de vapeur.

La chaudière peut être complétée par un *réchauffeur* d'eau d'alimentation, qui chauffe l'eau, mais sans la vaporiser, et quelquefois elle est munie d'un *surchauffeur*, destiné à élever la température de la vapeur, sans en augmenter la pression.

96. Combustibles. — Les combustibles pour le service des chaudières sont quelquefois choisis de manière à obtenir une vaporisation exceptionnellement active, ou en vue de la commodité de l'emploi. Mais le plus souvent, on recherche le combustible qui coûte le moins cher [1].

La caractéristique essentielle d'un combustible est le *pouvoir calorifique :* c'est le nombre de calories que dégage la

[1] Il peut arriver que ce combustible le moins cher ne soit pas celui dont le prix à la tonne est le moindre, car les cendres et l'eau s'ajoutent inutilement, ou plutôt d'une manière nuisible, au véritable combustible.

combustion complète d'un kilogramme. Certains *calorimètres*, notamment celui de Mahler, permettent la détermination précise de ce pouvoir calorifique. Les produits de la combustion sont l'acide carbonique et la vapeur d'eau [1].

Le combustible contient des substances inertes, qui forment les cendres après la combustion. La cendre de houille consiste surtout en fragments schisteux et siliceux ; elle contient souvent de l'oxyde de fer, donné par les *pyrites*, après la combustion du soufre et du fer qui les composent.

La proportion de cendres se mesure après l'*incinération* au rouge, en présence de l'air, du combustible pulvérisé. Cette opération exige, pour une livraison de houille, une *prise d'essai*, qui doit en représenter la teneur moyenne en cendres.

Certains combustibles contiennent une grande proportion d'eau : elle forme encore le quart ou le cinquième du bois bien séché à l'air. Les combustibles minéraux peuvent aussi absorber de l'eau : un kilogramme de coke sec, exposé à la pluie, peut en prendre 200 et même 250 g. Cette eau augmente le poids apparent du combustible ; dans l'emploi, elle emporte la chaleur qui la transforme en vapeur.

La houille renferme aussi des proportions d'eau variables, et assez importantes pour rendre difficile le contrôle des poids vendus ; surtout après l'opération du lavage, les charbons menus en tiennent une forte proportion.

Les principales espèces de houilles se classent d'après leur teneur en matières volatiles. La calcination dégage ces matières volatiles : elles contiennent surtout des com-

[1] Cette vapeur d'eau se condense dans le calorimètre, et y abandonne un certain nombre de calories. Dans la combustion normale, au contraire, cette vapeur d'eau se dégage sans être condensée, de sorte que les calories correspondant à sa chaleur latente ne peuvent être utilisées. Par exemple, un kilogramme de houille grasse, à 3 p. 100 de cendres, donnera au calorimètre un pouvoir calorifique de 9 000 calories ; la combustion produira 3,03 kg d'acide carbonique et 0,45 kg de vapeur d'eau, dont la chaleur latente, indiquée par le calorimètre, mais non utilisée en pratique, sera de 270 calories. Cette perte s'ajoute à celle qui résulte de la température généralement assez élevée des gaz rejetés.

posés d'hydrogène et de carbone. La proportion de carbone fixe qui reste après la calcination est, par suite, inférieure à la proportion totale de carbone contenu dans le combustible. On compte généralement les proportions de matières gazeuses et de carbone fixe pour la houille supposée pure, c'est-à-dire entièrement privée d'eau, par une dessiccation à 100°, et des matières stériles qui forment les cendres. Suivant la nature des houilles, la calcination dans un creuset donne un culot de coke plus ou moins compact, ou des grains isolés.

Les *anthracites* ne renferment qu'une faible proportion de matières volatiles. Ils s'enflamment difficilement, et les morceaux isolés s'éteignent rapidement; en masse, ils donnent un bon feu avec peu de flammes et sans fumée. Il convient, pour la bonne combustion, que les fragments soient tous à peu près de même taille.

La partie combustible des *houilles maigres* tient 7 à 10 g de matières volatiles contre 93 à 90 g de carbone fixe. Elles brûlent avec une flamme courte en donnant peu de fumée.

Les *houilles demi grasses* renferment 10 à 15 g de matières volatiles pour 85 à 89 g de carbone fixe ; les fragments s'agglutinent au feu.

Les *houilles grasses* tiennent 15 à 20 g de matières volatiles pour 85 à 80 g de carbone fixe ; elles se ramollissent au feu, fondent en partie et se prennent en masse ; cette propriété est utilisée dans la chauffe du fer de forge, avec les houilles dites *maréchales*. La flamme des variétés de houilles grasses est tantôt courte et tantôt longue.

Les *houilles sèches à longue flamme* ou *flambantes* sont les plus riches en matières gazeuses (20 à 25 g pour 80 à 75 g de carbone fixe). Elles brûlent avec flamme et fumée abondantes, sans s'agglomérer.

Les *lignites* sont des combustibles minéraux qui proviennent de couches moins anciennes que celles des véritables terrains houillers. Il en existe d'assez nombreuses variétés. Le plus souvent, le lignite est de couleur brune ou noire,

plutôt terne que brillante. Il donne une fumée abondante d'une odeur désagréable ; il renferme une forte proportion d'eau, de sorte qu'à poids égal le pouvoir calorifique est moindre que celui de la houille.

La *tourbe* est le produit de l'altération de divers végétaux sous l'influence combinée de l'eau et de l'air. Elle contient principalement du carbone, des cendres, et une grande proportion d'eau, qu'on élimine partiellement en faisant bien sécher les morceaux découpés dans les bancs tourbeux. Une bonne tourbe peut produire en brûlant à peu près la même quantité de chaleur qu'un poids égal de bois.

Pour la production de la vapeur, on préfère généralement les houilles demi grasses ; mais les seules, qu'on n'emploie guère pour cet usage, sont les houilles grasses, qui ne sont pas les plus abondantes, et qu'on recherche surtout pour la fabrication du gaz d'éclairage et du coke. L'agglomération des morceaux en rend d'ailleurs la combustion difficile sur grille.

La proportion et la nature des cendres ont une grande importance. Non seulement les cendres réduisent la quantité de véritable combustible dans la masse transportée et vendue ; mais elles gênent la combustion. Quand elles sont *infusibles* à la chaleur, comme la plupart des cendres blanches, elles tombent en poussière et traversent sans peine les grilles, ou sont entraînées par le tirage. Les cendres très *fusibles* coulent sans trop gêner la combustion. Les cendres à demi fusibles sont les plus gênantes : elles empâtent et encrassent les grilles, sous forme de *mâchefers*.

Le mode d'emploi de la houille dépend beaucoup de l'état physique et de la grosseur des fragments. Les opérations de triage et de classement deviennent de plus en plus minutieuses sur le carreau des mines. On sépare les gros morceaux, puis ceux de taille moyenne, gros à peu près comme le poing, qu'on désigne sous le nom de *gailleterie*. Le *tout venant* renferme des grosseurs mélangées : souvent on en a retiré les plus gros morceaux, ou les menus les plus fins.

Enfin les *menus* constituent des catégories variées, suivant les dimensions des grilles de criblage. Ces menus sont parfois de mauvais combustibles, mélangés d'une forte proportion de matières terreuses ; inversement, les lavages peuvent séparer en grande partie ces matières, si bien qu'ils deviennent les sortes les plus pures.

L'exploitation de certaines houilles donne une forte proportion de gros morceaux ; d'autres, très friables, n'existent guère qu'à l'état de menus.

Les *briquettes* sont formées de houille très menue, qui peut avoir été débarrassée d'une partie de ses cendres par le lavage, et de *brai*, à raïson d'environ 80 kg par tonne. Une forte compression produit l'agglomération. La briquette, bien préparée avec de bonnes matières, est un excellent combustible facile à employer. Elle s'emmagasine bien, et peut se conserver plusieurs années sans altération notable.

Les *cokes de gaz* servent parfois à la production de la vapeur ; on ne fabrique plus guère de *coke de four* spécialement pour cet usage. Le principal avantage du coke est de ne pas donner de fumée ; il est inférieur à la houille dont il provient, puisque cette houille est privée des éléments gazeux. Par suite de ce départ, la proportion de cendres, rapportée au kilogramme, est plus forte dans le coke.

Les *goudrons* de houille et les résidus de distillation du *pétrole* sont d'excellents combustibles, d'un emploi très commode pour la production de la vapeur.

Le pouvoir calorifique des houilles usitées en pratique pour la production de la vapeur est en général de 7 000 à 9 000 calories par kg ; celui des lignites ne dépasse guère 5 000 calories.

97. Combustion. — La combustion est la combinaison chimique avec l'oxygène de l'air des parties combustibles, le carbone et l'hydrogène, qui forme avec le carbone divers composés, dits *carbures d'hydrogène*. Ces carbures d'hydrogène

se dégagent lorsqu'on chauffe la houille; c'est ainsi qu'on produit le gaz d'éclairage, en soustrayant la houille, pendant cette *distillation*, à l'action de l'air qui emflammerait les gaz chauds dégagés. Avec ces gaz combustibles se dégagent aussi une petite proportion de gaz *inertes* (non combustibles), tels qu'azote, acide carbonique.

La combustion de l'hydrogène donne de la vapeur d'eau : 1 kg d'hydrogène se combine avec 8 kg d'oxygène pour donner 9 kg d'eau, et cette combinaison dégage 34 460 calories. Le carbone forme avec l'oxygène deux composés différents : 6 kg de carbone et 8 kg d'oxygène produisent 14 kg d'*oxyde de carbone*, qui est un gaz encore combustible ; 8 autres kg d'oxygène et 14 kg d'oxyde de carbone (ou 16 kg d'oxygène et 6 kg de carbone) forment 22 kg d'*acide carbonique*, qui n'est plus combustible. La transformation d'un kg de carbone en acide carbonique dégage 8 080 calories, tandis que la formation de l'oxyde de carbone n'en produit que 2 500, ou les trois dixièmes de la quantité de chaleur totale que donnerait la combustion complète.

Connaissant les quantités de carbone et d'hydrogène à brûler dans un kg d'une houille déterminée, on peut facilement calculer le poids d'oxygène nécessaire pour la combustion complète de ces deux éléments. L'oxygène se trouve dans l'air, mélangé à l'azote et à quelques autres gaz inertes, à raison de 230 g d'oxygène dans un kg d'air. En faisant ce calcul, on trouve que les houilles de qualités courantes exigent environ 12 kg d'air par kg, ou 9 m^3 à la température et à la pression ordinaires.

Si la quantité d'air fournie est moindre que celle qui est strictement nécessaire, il est certain qu'une partie du combustible va se perdre à l'état de gaz non brûlés, carbures d'hydrogène ou oxyde de carbone. Si la quantité d'air est plus grande, l'excès d'air non utilisé pour la combustion sortira avec les gaz brûlés par la cheminée : comme ces gaz sont rejetés à une température encore assez élevée, ils emportent un certain nombre de calories, qui sont perdues :

par conséquent, il est intéressant de ne pas exagérer l'excès d'air. Mais il est impossible en pratique de régler, avec la précision des dosages chimiques, la proportion d'air qui entre dans un foyer ; en outre, il n'y a pas mélange homogène dans toute l'étendue du foyer, de l'air et des gaz combustibles : aussi un petit excès d'air est-il désirable ; mais il convient que cet excès soit aussi faible que possible.

L'analyse chimique des gaz rejetés par un foyer permet de reconnaître si l'air est trop abondant ou s'il fait défaut. Comme la composition du courant gazeux est variable, il importe que les analyses soit multipliées ; c'est surtout la rapidité plus qu'une exactitude minutieuse qui convient pour ces essais. Certains appareils, tels que celui d'Orsat, permettent des dosages faciles. C'est une opération qui devrait être faite de temps en temps dans toutes les installations de quelque importance : les résultats des essais seraient communiqués aux chauffeurs, à moins qu'ils ne fassent eux-mêmes ces dosages, après un facile apprentissage.

La combustion exige non seulement des proportions convenables de combustible et d'air, mais il faut aussi que ces deux éléments, pour se combiner, soient portés au préalable à une température assez élevée. L'air entre généralement froid dans un foyer ; il passe sur des morceaux de combustible en ignition et s'échauffe à leur contact : la combustion peut alors se produire ; elle dégage de la chaleur et échauffe le combustible restant. Mais on comprend aisément qu'un trop grand excès d'air, loin de la faciliter, pourrait refroidir la masse au point de gêner et même d'arrêter la combustion complètement. Une température élevée dans le foyer, supérieure à celle qui serait strictement nécessaire, est très utile pour la bonne combustion.

98. Grilles. — On brûle habituellement les combustibles minéraux sur une grille horizontale ou légèrement inclinée, composée de barreaux en fonte ou en fer (fig. 200 et 201)

Par des chargements plus ou moins espacés, on entretient sur la grille une couche d'épaisseur à peu près uniforme.

En coupe transversale, le barreau est aminci vers le bas, afin qu'un fragment engagé entre deux barreaux ne s'y coince pas, mais tombe aisément. La hauteur doit être assez

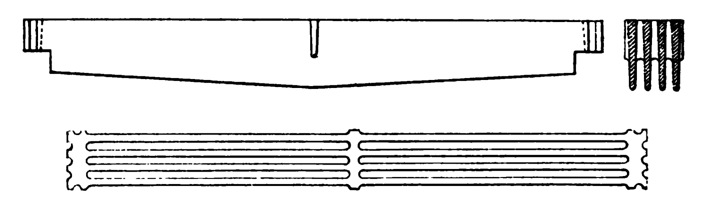


Fig. 200. — Barreau de grille en fonte.

grande, pour qu'il ne fléchisse pas. De plus, une grande hauteur donne une grande surface de contact du métal et de l'air, doublement avantageuse en refroidissant le barreau et en échauffant l'air.

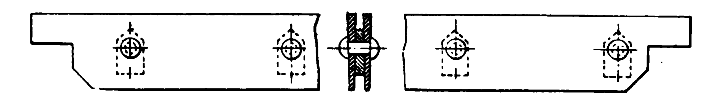


Fig. 201. — Barreau de grille en fer.

Les barreaux reposent par leurs extrémités sur des grosses barres transversales ou *sommiers*, encastrés dans les murs de briques qui entourent les foyers, ou fixés sur parois métalliques de la chaudière dans le cas de foyers *intérieurs*.

Il convient de remplacer à temps les barreaux usés ou affaissés, de manière que toute la surface de la grille soit régulière, car une dépression y fait brûler les barreaux voisins. L'épaisseur de la couche chargée sur la grille ne doit être ni trop forte, car elle dégagerait des gaz combustibles non brûlés, ni trop faible, car elle laisserait passer un excès d'air ; il faut la déterminer pour chaque espèce de

charbon ; elle varie d'ailleurs avec l'activité de la combustion. Cette épaisseur doit être maintenue à peu près uniforme : si on la laisse diminuer en un endroit, l'air y passe plus facilement et active la combustion : bientôt il se forme un vide sur la grille. Quand on bouche ce vide avec du charbon frais, la combustion se ralentit au contraire.

L'épaisseur de la couche est de 8 cm environ avec les houilles ordinaires; elle est bien moindre avec les menus maigres, et peut être plus forte avec certains combustibles en gros morceaux. Autant que possible, il convient que la grosseur des fragments ne dépasse pas celle du poing.

En plan, la grille a une forme rectangulaire; elle garnit la partie inférieure du foyer. Sur un des côtés du rectangle se trouvent la porte ou les portes de chargement; sur le côté opposé est l'*autel*, mur en briques qui dépasse de 30 ou 40 cm la surface de la grille, pour maintenir le combustible. Les deux autres côtés sont formés par des murailles en briques (ou par les parois des chaudières, dans le cas des foyers *intérieurs*). Au-dessous de la grille est le *cendrier*, contenant parfois une couche d'eau pour éteindre les escarbilles qui y tombent.

La largeur de la grille (dimension parallèle à la façade et à l'autel), peut être quelconque; la *longueur* ne dépasse guère 2 m pour la commodité du chargement et du nettoyage, quand la grille est horizontale. Les grilles très inclinées des locomotives atteignent et dépassent la longueur de 3 m.

Autant que possible, on doit ménager entre la grille et la chaudière qu'elle chauffe un espace un peu grand, dit *chambre de combustion*, où se produit la combinaison des gaz combustibles et de l'air.

Certains charbons, dont les cendres deviennent pâteuses à la chaleur, forment sur les grilles des galettes de mâchefer, qui finissent par gêner et ralentir beaucoup la combustion. Il faut, au bout d'un certain nombre d'heures de marche, retirer ces mâchefers : l'opération pénible du *décrassage de la grille* ne va guère sans perte de combustible, et un certain

délai est nécessaire après ce travail pour que le feu soit rétabli en bon état.

L'air nécessaire à la combustion entre dans le cendrier et traverse la grille; les barreaux le distribuent en nappes parallèles à travers la couche de combustible. Parfois on laisse aussi entrer un peu d'air par la porte ou par des ouvertures spéciales, au-dessus de la grille, lorsque les charbons contiennent beaucoup de matières volatiles, ou lorsqu'on les charge en couche épaisse; mais il ne faut pas exagérer cette admission d'air supplémentaire, parce qu'elle risque de refroidir par trop les gaz du foyer et d'empêcher la combustion au lieu de la favoriser.

99. Grilles spéciales. — Aux barreaux ordinaires, on substitue dans certains cas divers systèmes de grilles fixes ou mobiles. Par ces systèmes on cherche à obtenir l'un ou l'autre des effets suivants, ou plusieurs ensemble : améliorer la combustion, éviter la fumée, charger mécaniquement le combustible, produire automatiquement le décrassage. Les résultats obtenus sont assez variables suivant les cas et selon la nature des combustibles employés. Les descriptions qui suivent s'appliquent à des appareils choisis comme types parmi les très nombreuses dispositions proposées.

Le principal inconvénient de la grille ordinaire est l'irrégularité du régime de la combustion qu'elle permet de réaliser. Qu'on suppose une grille chargée d'une couche uniforme de charbon bien allumé : la plupart des matières volatiles sont déjà dégagées, et le combustible se compose de morceaux de coke incandescents, entre lesquels l'air passe facilement. Pour ce motif, la proportion d'air est probablement trop forte; la combustion se fait bien, mais avec excès d'air. Sur ce combustible incandescent, on vient charger une couche de houille fraîche. Cette houille, souvent un peu humide, refroidit le foyer; un certain refroidissement résulte aussi de l'entrée de l'air pendant l'ouverture des

portes de chargement. En outre, la houille, si elle est menue, obstrue les passages que l'air trouvait précédemment entre les fragments de coke. Cette houille fraîche, chauffée par la couche inférieure, commence à se sécher ; puis les gaz combustibles distillent. A ce moment, il faudrait une proportion d'air assez grande pour brûler ces gaz ; mais l'obstruction des passages gêne l'accès de l'air : de plus, la température des gaz n'est pas encore très élevée ; donc, et par défaut d'air, et par température trop basse, la combustion se fait mal ; les gaz combustibles ne se brûlent pas complètement ; notamment le carbone qu'ils contiennent se sépare sans brûler, en particules noires très fines, qui colorent la fumée : de plus, la fumée peut contenir beaucoup de gaz combustibles invinsibles, hydrocarbures et oxyde de carbone, qui sont perdus.

On peut remédier à l'insuffisance de l'air par une admission supplémentaire au-dessus de la grille, en ouvrant des ouvertures convenables dans les portes ou à côté : cette admission supplémentaire est utile dans certains cas, mais elle ne remédie pas à la seconde cause de la mauvaise combustion, température trop faible ; au contraire, elle abaisse encore la température et peut être nuisible.

Certains appareils sont disposés pour régulariser cette admission supplémentaire d'air au-dessus de la grille ; pour les raisons qui viennent d'être indiquées, ils demandent à être surveillés de près. Il est très avantageux que l'air ainsi admis en supplément soit préalablement chauffé.

Petit à petit les gaz distillent, la nouvelle charge s'échauffe, et l'air retrouve des passages suffisants, de sorte qu'on revient à l'état primitif, caractérisé par une bonne combustion, mais avec excès d'air.

En résumé, la proportion d'air est alternativement trop petite et trop grande. Cet inconvénient est d'autant plus grave que les chargements sont plus rares et plus abondants. Un chauffeur habile l'atténue en chargeant fréquemment le foyer, par petites quantités à la fois, de manière à

entretenir en un état presque uniforme la masse de combustible.

Un moyen assez simple pour améliorer la combustion sur les grilles ordinaires consiste à monter, à une certaine hauteur au-dessus du combustible, une voûte en briques réfractaires ; cette disposition est très fréquente dans les foyers de locomotives (fig. 202). La voûte prend une température

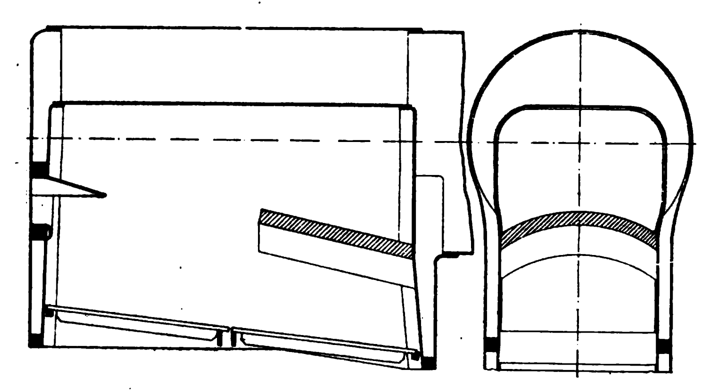


Fig. 202. — Foyer de locomotive, avec *voûte en briques* et porte à *déflecteur;* coupes longitudinale et transversale. Le déflecteur rabat vers le courant gazeux l'air qui entre par la porte de chargement.

très élevée, et échauffe l'air et les gaz que donne la distillation de la houille fraîchement chargée; elle contribue ainsi à assurer une bonne combustion.

Pour régulariser la combustion sur les grilles larges, munies de deux portes de chargement, on peut procéder par chargements alternatifs sur les deux moitiés de droite et de gauche; mais il faut réunir les courants gazeux, dont l'un renferme un excès d'air très chaud, et l'autre, des gaz combustibles à moindre température : il convient que des voûtes en briques dirigent les deux courants l'un vers l'autre.

Un moyen très simple en principe, pour faire disparaître

l'irrégularité du régime de la combustion sur les grilles ordinaires, consiste à renverser le sens du courant gazeux : l'air frais arrive au-dessus du combustible et les flammes sortent au-dessous de la grille, à travers les barreaux.

La grille porte alors une couche de combustible qu'il est facile d'entretenir dans un état sensiblement uniforme : à la base le coke incandescent, dont les cendres tombent à travers les barreaux ; au-dessus le combustible en ignition, dégageant ses matières volatiles, et enfin à la partie supérieure, le combustible frais, se séchant et commençant à distiller. Les chargements ne troublent guère ce régime régulier. L'avantage résulte de ce que le combustible, depuis le chargement jusqu'à la chute du résidu dans le cendrier, circule dans le même sens que le courant gazeux, au lieu de marcher en sens opposé, comme sur une grille ordinaire.

La grande difficulté pratique, dans l'application de ce système, vient de ce que les barreaux ordinaires, fortement chauffés, se détruisent très rapidement. Il a fallu les remplacer par des tubes pleins d'eau, en communication avec la chaudière; l'entretien de ces tubes et surtout de leurs assemblages, est assez délicat. On est conduit à les écarter plus que les barreaux ordinaires, ce qui augmente la perte de combustible par chute entre les barreaux. Le système Hawley remédie à ce dernier défaut par l'emploi de deux grilles superposées ; le combustible est chargé sur la grille supérieure, *renversée* à tubes d'eau, d'où il tombe, à l'état de coke incandescent, sur une grille ordinaire, où s'achève la combustion.

On obtiendrait l'avantage de la grille renversée, en conservant la grille ordinaire, si l'on parvenait à faire le chargement du combustible frais non pas par-dessus le combustible en ignition, mais en dessous, entre la grille et la masse incandescente. C'est ce que réalisent plus ou moins bien certains appareils, tels que celui de Duméry, où des pous-

soirs latéraux refoulent le charbon sur les barreaux, en soulevant celui qui a été précédemment chargé.

On peut obtenir un régime uniforme en donnant à la grille ordinaire une forte inclinaison. Cette inclinaison doit être un peu inférieure à celle du *talus* naturel d'*éboulement* du combustible employé. La masse du combustible est alors comprise entre la grille et la surface inclinée suivant le talus d'éboulement, de sorte que l'épaisseur sur la grille va en diminuant depuis la partie supérieure jusqu'au bas : à mesure que la combustion avance, le combustible descend, le chargement se faisant à la partie supérieure ; on trouve constamment de la houille fraîche en haut de la grille, puis une zone où les gaz se dégagent et enfin le coke incandescent en bas. L'air à tendance à passer surtout par la partie inférieure, où l'épaisseur est la moindre ; mais tous les courants gazeux doivent être dirigés vers un point commun où ils se brassent et se confondent.

Les cendres et les escarbilles s'accumulent à la partie inférieure : parfois la grille se termine à une certaine distance du fond du cendrier, et le tas de cendres, qui s'élève jusqu'à la grille, bouche l'espace qui reste libre. La combustion doit être terminée quand le combustible arrive au bas de la grille se joindre à ce tas de déchets ; d'autre part, elle ne doit pas se terminer trop tôt, pour éviter que la partie inférieure de la grille ne se découvre et ne laisse passer un grand excès d'air.

Ces grilles inclinées se prêtent bien au chargement mécanique ; il suffit de verser la houille dans une trémie qui dessert la partie supérieure de la grille; si le combustible est suffisamment menu, on peut l'amener automatiquement dans la trémie à l'aide de norias et de vis d'Archimède.

Ces grilles inclinées peuvent être formées de barreaux ordinaires dirigés suivant la pente. A égalité d'écartement, elles laissent tomber les fragments plus facilement que les grilles horizontales, à cause du mouvement de descente du combustible. La *grille à gradins* est formée de lames plates

qui sont comme des marches d'escalier, mais se recouvrant assez fortement en plan, et sans contre-marches; les cendres forment un talus sur chaque gradin. A cause des accumulations de cendres et d'escarbilles chaudes qu'ils portent, ces barreaux plats sont sujets à se brûler rapidement. Aussi ne les emploie-t-on guère que pour des combustibles spéciaux ne produisant pas de températures très élevées, comme la sciure de bois. Quelquefois on a placé à l'intérieur des tubes à circulation d'eau pour les rafraîchir.

Dans la grille Donneley, le combustible est compris entre deux grilles verticales parallèles voisines, l'une formée de barreaux ordinaires, l'autre de tubes d'eau; il se charge par la partie supérieure. Le régime de la combustion est bien régulier, et la conduite est moins délicate que celle des grilles inclinées.

On obtient aussi l'avancement méthodique et régulier du combustible sur des grilles horizontales, en donnant aux barreaux des mouvements convenables. En numérotant les barreaux successifs, qui sont dirigés suivant la longueur de la grille, perpendiculaire à la façade du foyer, les barreaux de numéro impair forment un groupe relié à un mécanisme de commande, et les barreaux pairs un second groupe commandé de même.

Les mouvements sont tels que les barreaux d'un des groupes se soulèvent quand les barreaux de l'autre groupe s'abaissent; en même temps les barreaux soulevés ont un mouvement de translation qui les éloigne de la façade, tandis que les barreaux abaissés reviennent en sens contraire. Le combustible est à chaque instant soulevé et porté en avant. Le chargement se fait par une trémie placée au-dessus de la partie antérieure de la grille et peut être automatique. Lorsqu'un fragment arrive à la partie postérieure de la grille, il doit être entièrement brûlé, car un instant après il est rejeté dans le cendrier. D'autre part, il ne faut pas que la grille se dégarnisse trop tôt, parce que les barreaux non chargés laisseraient passer un grand excès d'air.

La vitesse de commande des barreaux, l'importance du chargement, et le tirage, doivent donc être soigneusement réglés, de manière à se correspondre ; et un nouveau réglage est nécessaire si on veut passer d'un régime de combustion à un autre plus ou moins actif.

Aussi ces systèmes conviennent-ils surtout aux batteries de chaudières auxquelles on demande une production uniforme. Il faut remarquer que les mouvements des barreaux gênent la formation des galettes de mâchefer, et décrassent automatiquement la grille.

L'ancienne grille Taillefer, et quelques grilles analogues plus récentes, se composent d'une sorte de chaîne de Galle très large passant sur deux poulies, qui lui donnent un mouvement direct de translation. Le combustible est chargé à une extrémité et les cendres sont rejetées à l'autre.

100. Appareils divers de combustion. — Au lieu de brûler directement la houille dans le foyer qui doit produire la chaleur, on peut au préalable s'en servir pour fabriquer des gaz combustibles, carbures d'hydrogène et oxyde de carbone, dans des appareils dits *gazogènes*, où l'air traverse une masse assez épaisse de combustible. La chaleur produite par la formation de l'oxyde de carbone est en grande partie perdue : on peut l'utiliser à décomposer une certaine proportion de vapeur d'eau, en hydrogène et en oxygène, qui forme dans le gazogène de nouvelles quantités d'oxyde de carbone.

Cette production de combustible gazeux est commode pour certains emplois : il alimente dans de très bonnes conditions certains fours métallurgiques ; il peut faire fonctionner des moteurs à gaz ; mais pour la simple production de la vapeur, ce système ne présente pas d'avantages, car il exige des installations coûteuses et cause toujours une certaine perte de chaleur.

L'emploi du gaz sous les chaudières est d'ailleurs commode ; il suffit de le faire arriver avec une proportion d'air

convenable dans des foyers en briques, qui se trouvent maintenus à une température assez élevée pour l'inflammation et la combustion complète. On règle facilement les proportions d'air et de gaz.

Souvent on emploie, dans ces conditions, le gaz combustible produit par les hauts fourneaux qui servent à la fabrication de la fonte.

Au lieu de gazéifier le combustible solide, si on le broie en poudre très fine, entraînée par un courant d'air, cette poudre s'enflamme et brûle comme un jet de gaz. Ce procédé a été quelquefois employé pour la combustion de la houille sous les chaudières : les jets combustibles se règlent facilement ; mais la dépense du broyage est assez importante ; de plus, la poudre très fine qui en résulte présente quelque danger, car elle s'enflamme accidentellement avec une grande facilité et peut donner lieu à des explosions.

En résumé, les grilles spéciales et mécaniques peuvent rendre service dans certains cas, principalement pour les grandes batteries de chaudières auxquelles on demande une production uniforme.

101. Combustibles spéciaux. — Certains combustibles exigent des appareils spécialement appropriés. Les cokes et les anthracites très menus tombent entre les barreaux des grilles ordinaires. On les charge sur des grilles spéciales ayant des fentes très étroites (fig. 203), ou sur des plaques percées de petits trous, avec une soufflerie en dessous.

Les copeaux et les déchets de bois se brûlent dans des cuves en maçonnerie placées auprès des chaudières (fig. 204); le chargement se fait par l'ouverture supérieure de la cuve ; l'air y pénètre latéralement près du fond, et un carneau conduit les gaz combustibles au-dessus de la grille de la chaudière.

On brûle aussi la *tannée*, ou les écorces broyées qui ont servi à la préparation du cuir, substance qui renferme encore beaucoup d'eau (près de la moitié du poids) après

dessiccation à l'air. La figure 205 représente une grille conique à gradins disposée pour ce combustible.

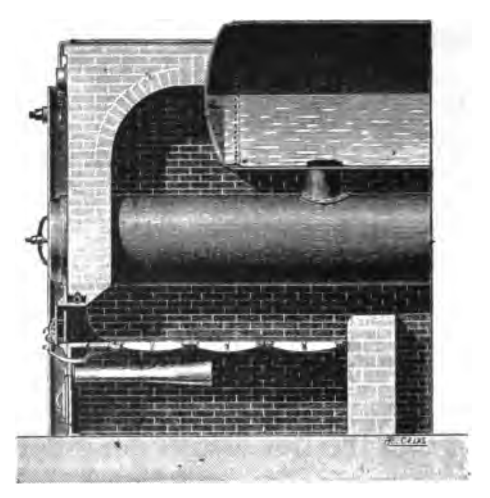


Fig. 203. — Foyer Meldrum, pour la combustion des menus. Les barreaux laissent entre eux des fentes très étroites, l'air est soufflé par des jets de vapeur dans un cendrier clos.

102. Combustibles liquides. — Les combustibles liquides, brûlés sous les chaudières dans certaines régions, ou dans quelques cas spéciaux, sont des résidus de pétrole et des goudrons de houille. La distillation des pétroles bruts donne successivement des essences, des huiles d'éclairage et des huiles de graissage : le résidu, analogue au goudron, est un excellent combustible, dépourvu de cendres, et dont 10 kg peuvent remplacer 15 à 17 kg de bonne houille.

Pour brûler ce combustible, on se sert d'une sorte d'éjecteur à tuyères concentriques, où un courant de vapeur entraîne le liquide et le projette en jet finement pulvérisé, (fig. 206). Ce jet produit un appel de l'air nécessaire à sa combustion. Un de ces jets, ou plusieurs jets pareils, brûlent dans le foyer de la chaudière, convenablement garni de briques réfractaires. Au début, un peu de combustible solide

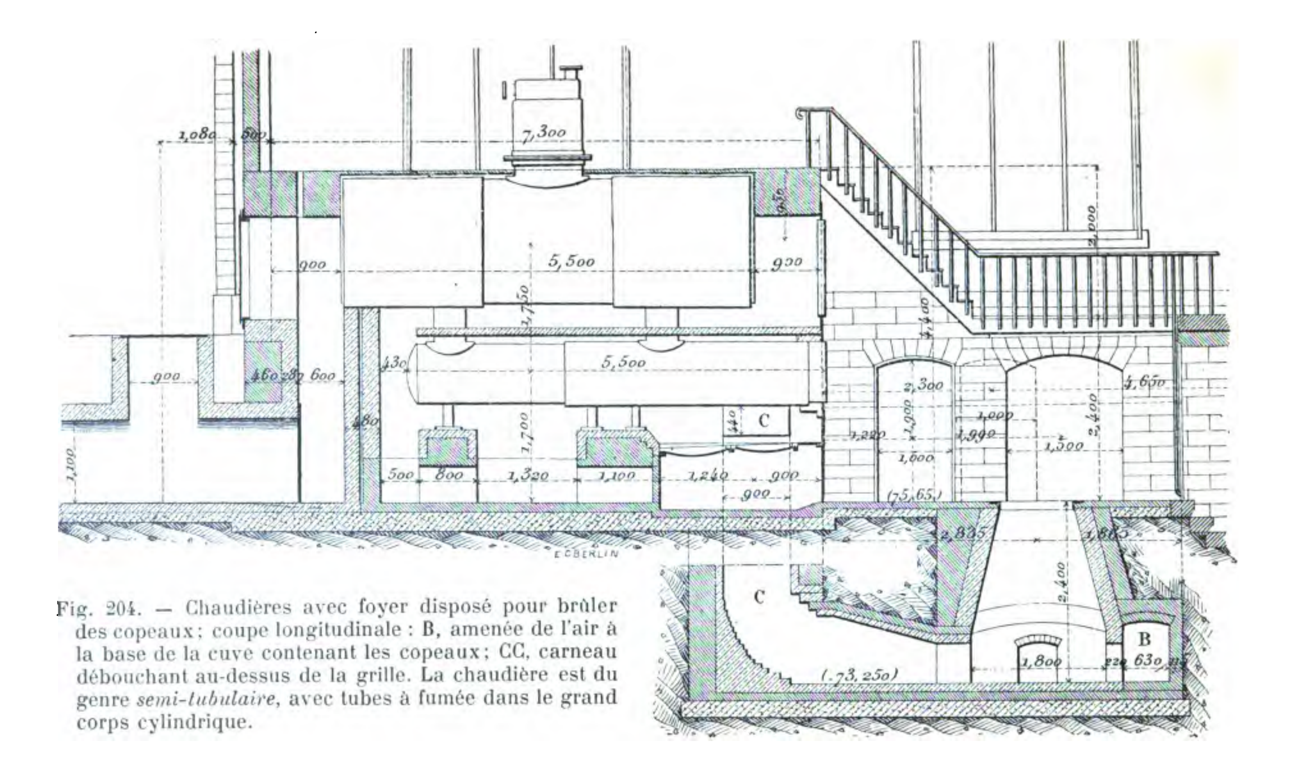


Fig. 204. — Chaudières avec foyer disposé pour brûler des copeaux; coupe longitudinale : B, amenée de l'air à la base de la cuve contenant les copeaux; CC, carneau débouchant au-dessus de la grille. La chaudière est du genre *semi-tubulaire*, avec tubes à fumée dans le grand corps cylindrique.

produit l'allumage; ensuite le jet s'allume au contact des briques portées au rouge, même après un arrêt de courte durée.

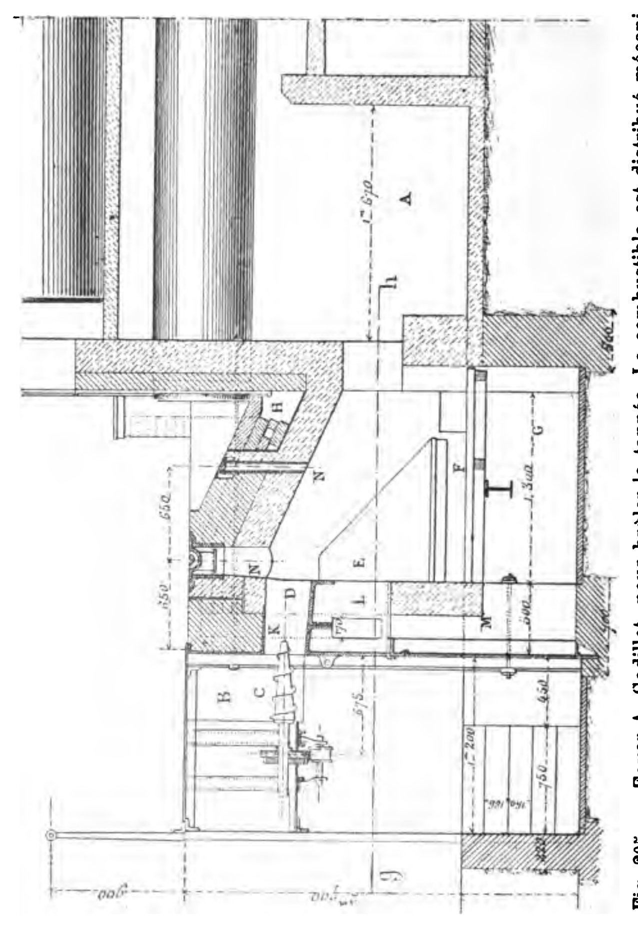


Fig. 205. — Foyer A. Godillot, pour brûler la tannée. Le combustible est distribué mécaniquement à la partie supérieure de la grille à gradins E, en forme de tronc de cône. Pour la combustion de la houille, les barreaux présentent, du côté de l'admission de l'air, des rigoles tenues pleines d'eau.

La vapeur ne produit que l'entraînement du combustible et de l'air, et n'a aucune action directe sur les phénomènes de la combustion. La dépense est d'environ 0,4 kg de vapeur

par kilogramme de combustible, qui peut produire jusqu'à 14 kg de vapeur.

En mer, pour éviter la consommation d'eau, qui doit être réparée par les appareils distillateurs, on substitue l'air comprimé à la vapeur.

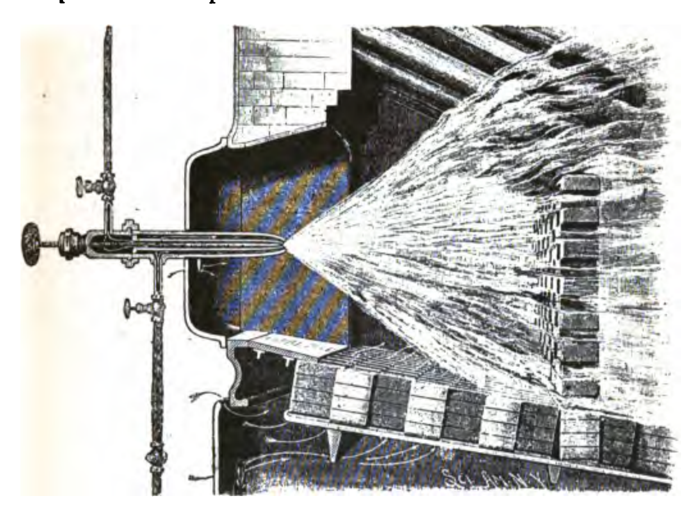


Fig. 206. — Brûleur Burton. Le pétrole arrive par le tube vertical inférieur, autour du tube horizontal, où une aiguille règle l'admission de vapeur. L'air arrive autour du tube et sous la grille. Un écran en briques protège les tubes contre l'action immédiate de la flamme.

Les dispositions de détail des brûleurs sont très variées. Certains ont des fentes qui donnent des nappes au lieu de jets à section circulaire. Pour faciliter l'arrivée aux brûleurs du liquide, parfois très épais, surtout quand la température est basse, le réservoir qui le contient peut être chauffé par un serpentin rempli de vapeur.

103. Tirage. — Le tirage est dit *naturel* lorsqu'il est provoqué seulement par une cheminée, et *forcé* lorsque le courant gazeux est activé par des ventilateurs ou par des jets

de vapeur ou d'air comprimé. La mesure du tirage est donnée par la différence entre la pression de l'air avant l'entrée dans le foyer et au point où il quitte la chaudière, c'est-à-dire au pied de la cheminée ou dans la boîte à fumée. On observe aisément cette différence à l'aide d'un manomètre à eau, dont une branche s'ouvre librement au dehors et dont l'autre pénètre dans le conduit de fumée. Elle s'exprime en millimètres d'eau (correspondant chacun à 1 kg par m²). Le tirage naturel, produit par les cheminées usuelles, atteint 10 à 12 mm; avec le tirage forcé, on dépasse 150 mm.

Pour le tirage naturel, la section d'une cheminée doit être de 0,2 m² par m² de grille, soit 1/5, avec une hauteur de 20 à 30 m. Une section suffisamment étendue est plus importante qu'une très grande hauteur. Avec le tirage d'une telle cheminée, on arrive à brûler convenablement 80 à 120 kg de houille ordinaire par m² de grille et par heure. Une température de 200° à 300° des gaz dans la cheminée produit le tirage le plus énergique; mais 150° suffisent encore. On modère aisément le tirage par la manœuvre d'un clapet placé à la partie supérieure de la cheminée, ou, plus commodément, d'un registre installé dans le carneau auprès de la chaudière. Pour éviter lors des chargements, par suite de l'ouverture des portes du foyer, l'entrée d'un excès d'air froid nuisible, il est bon, pendant cette opération, de refermer un peu le registre; quelquefois on conjugue mécaniquement le registre et la porte du foyer, de telle sorte que le registre s'abaisse quand on ouvre la porte.

Une disposition très ancienne, qui a été quelquefois reproduite, consiste à commander le registre par un régulateur qu'actionne la pression de la chaudière, de sorte qu'il s'abaisse quand la pression dépasse la limite fixée et s'ouvre davantage quand la pression baisse. Cette manœuvre automatique ralentit ou force la combustion suivant les besoins.

Souvent la fente dans laquelle joue le registre donne lieu à une rentrée d'air importante, qui contrarie le tirage. On

évite cet inconvénient en installant au-dessus de la fente une sorte de boîte en tôle, dans laquelle se loge le registre ouvert. Cette boîte n'a d'autre ouverture extérieure qu'un petit trou pour la tringle de manœuvre. Cette addition peut suffire pour améliorer un tirage insuffisant.

Lorsqu'on veut brûler par m² de grille et par heure une quantité de houille notablement supérieure à 120 kg, il est nécessaire de recourir au tirage forcé. Ce tirage forcé est obtenu soit par *aspiration* d'air dans la cheminée, soit par *insufflation* sous la grille.

Dans les machines sans condensation, la vapeur d'échappement, envoyée dans une *tuyère* placée dans l'axe de la cheminée, produit un tirage par aspiration très énergique, qui permet, dans la locomotive, des combustions de plus de 500 kg de houille par m² de grille et par heure. Pour que l'échappement donne les meilleurs résultats, il faut que les formes et les proportions de la tuyère et de la cheminée, et leur position respective, soient bien étudiées.

Souvent la tuyère d'échappement a une section variable qui permet d'agir sur l'intensité du tirage.

La vapeur d'échappement est employée de même pour quelques appareils autres que les locomotives, notamment les locomobiles.

A la vapeur d'échappement on peut substituer des jets de vapeur prise directement dans la chaudière, mais seulement d'une manière occasionnelle et pour une légère augmentation du tirage, sous peine de dépenser de ce chef beaucoup de vapeur. Ces jets de vapeur agissent par aspiration dans la cheminée (souffleur des locomotives) ou par insufflation sous les grilles : l'air refoulé est alors mélangé d'un peu de vapeur d'eau, ce qui n'a pas d'inconvénients.

Sur mer, où l'on veut réduire au minimum les pertes d'eau, on substitue l'air comprimé à la vapeur de ces souffleries.

Avec des ventilateurs, on peut obtenir un courant d'air énergique. Ils agissent le plus souvent par insufflation : il suffit de diriger sous la grille, dans un cendrier clos, l'air

qu'ils refoulent. Lorsqu'on ouvre la porte du foyer pour le chargement, les flammes sortent vers le chauffeur, à moins qu'on n'arrête, par la manœuvre d'un registre, le courant envoyé dans le cendrier. En insufflant l'air dans une chambre de chauffe complètement close, aucun retour de flamme n'est à craindre, mais l'air froid pénètre abondamment dans les foyers quand la porte est ouverte.

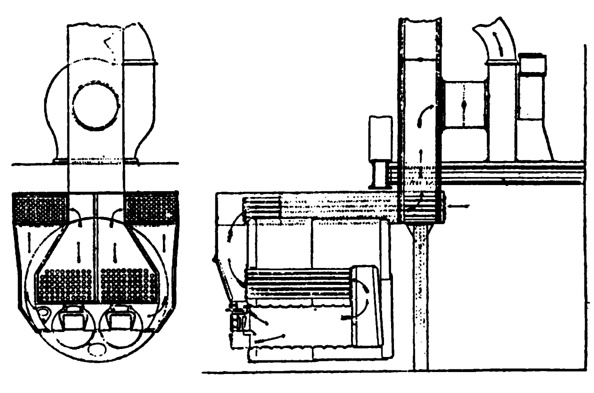


Fig. 207. — Tirage forcé par aspiration Ellis et Eaves, pour une chaudière marine, avec réchauffeur de l'air amené aux foyers. Le ventilateur aspire les gaz chauds des foyers à travers la chaudière, et les envoie dans la cheminée. Sur le trajet de ces gaz se trouvent deux faisceaux de tubes, placés au-dessus de la chaudière et dans lesquels passe l'air froid appelé aux foyers, qui s'échauffe aux dépens des gaz rejetés dans la cheminée.

Le tirage par aspiration est assez souvent employé, et donne de bons résultats tant qu'on ne dépasse pas une augmentation modérée de l'appel d'air, correspondant à des combustions de 150 à 200 kg par m^2 et par heure.

Dans les systèmes Ellis et Eaves (fig. 207), et Howden, employés sur mer, le ventilateur aspire directement les gaz chauds qui quittent la chaudière et les envoie dans la cheminée. Vu la température de ces gaz, le volume débité est à peu près doublé. Malgré l'augmentation des dimensions qui en résulte pour les ventilateurs, les résultats sont en

général satisfaisants. Il y a lieu de remarquer que, dans ce système, l'aspiration des fumées est combinée avec l'échauffement de l'air qui alimente les foyers, aux dépens de la chaleur perdue. L'air se chauffe dans un faisceau de tubes minces. Ce chauffage dépouille les gaz rejetés dans la cheminée d'une partie de la chaleur qu'ils emportent inutilement et la renvoie dans la chaudière; en outre, il améliore la combustion.

Au lieu d'employer le ventilateur à souffler ou à aspirer la totalité de l'air qui traverse le foyer de la chaudière, on peut s'en servir pour refouler l'air dans une tuyère disposée pour entraîner les gaz de la combustion, par une disposition qui présente une certaine analogie de principe avec l'échappement des locomotives. Dans le système Prat (fig. 208), cette tuyère est annulaire et suivie d'une cheminée divergente, de dimensions beaucoup moindres que la cheminée ordinaire à tirage naturel équivalent.

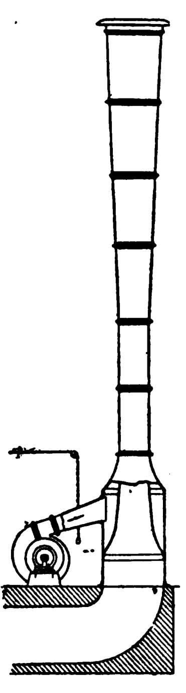


Fig. 208. — Tirage par ventilateur, système Prat. L'air est refoulé dans l'espace annulaire et s'en échappe par une ouverture annulaire, en entraînant au centre les gaz de la combustion.

Le tirage, naturel ou artificiel, produit le travail nécessaire pour la circulation de l'air dans le foyer, sous la chaudière et dans la cheminée. Par la combustion, cet air se charge des éléments du combustible, sauf les cendres, de sorte que tout le poids brûlé se trouve élevé par le tirage jusqu'à la partie supérieure de la cheminée.

104. Utilisation de la chaleur. — La chaleur, dégagée dans le foyer par la combustion, chauffe, puis vaporise l'eau

contenue dans la chaudière. La transmission se fait, à travers la tôle, par la *surface de chauffe* en contact avec les gaz chauds[1]. Cette surface de chauffe doit être assez grande pour refroidir suffisamment les gaz.

Pour apprécier exactement le fonctionnement de la surface de chauffe des chaudières, il faut savoir quelle quantité de chaleur elle laisse traverser. Le nombre de calories qui traverse un mètre carré de cette surface, en une seconde, varie beaucoup suivant l'endroit de la chaudière considéré : auprès de la grille, où se produit la combustion, cette quantité est relativement grande ; elle est beaucoup plus faible à l'extrémité de la chaudière, voisine de la cheminée, où les gaz de la combustion sont déjà très refroidis. A ce point de vue on distingue la surface de chauffe *directe*, qui se trouve placée en vue du foyer même, c'est-à-dire non seulement en contact avec les gaz les plus chauds, mais sous l'action de la chaleur rayonnante dégagée par la combustion, et la surface *indirecte*, parcourue par les gaz qui quittent le foyer et se rendent à la cheminée. Un mètre carré de surface directe reçoit, en une heure, plus de chaleur qu'un mètre carré de surface indirecte. Dans la surface indirecte, il y a de grandes inégalités d'un point à un autre, le mètre carré devenant de moins en moins efficace à mesure qu'il est baigné par des gaz moins chauds.

Pour fixer les idées, on peut indiquer une valeur moyenne de 30 calories par seconde transmises par un mètre carré de surface de chauffe directe dans les conditions moyennes. Mais cette valeur est très variable : on est arrivé, dans des expériences, à transmettre jusqu'à 140 calories (vaporisation de 1 000 kg d'eau par heure et par m^2).

[1] Quelquefois on compte la surface de chauffe de l'autre côté de la tôle, qui est en contact avec l'eau, mais la première manière est préférable. Avec les chaudières formées de tubes de petit diamètre la différence entre ces deux évaluations est importante; par exemple un tube de 40 mm de diamètre intérieur et de 45 mm à l'extérieur, long de 4 m, a une surface de 0,503 m^2 à l'intérieur et de 0,565 m^2 à l'extérieur.

La surface indirecte, dans sa partie la plus active, transmettra par m² une quantité un peu moindre que la surface directe, puisqu'elle ne reçoit pas de chaleur rayonnante, et cette quantité s'abaisse jusqu'à une faible valeur sur les derniers mètres carrés auprès de la cheminée, si la surface de la chaudière est suffisamment étendue.

Du nombre de calories on passe facilement au poids vaporisé par seconde ou par heure. Par exemple, pour vaporiser un kg d'eau à 180°, il faut 479 calories. Si l'eau doit être en outre chauffée de 15° à 180° dans la chaudière, il faut 646 calories par kg.

Ainsi quand on parle de la vaporisation d'une chaudière par mètre carré et par heure, il s'agit d'une moyenne entre des nombres bien différents. On trouve souvent, pour les chaudières à tirage naturel dans les conditions usuelles, une transmission moyenne de 3 calories par m² et par seconde, ce qui correspond à la vaporisation par heure d'environ 22 kg d'eau à 180°, ou de 16 à 17 kg si l'eau est prise à 15°. Dans des chaudières de locomotives, on arrive à des vaporisations moyennes, par m² de surface de chauffe, de 80 kg à l'heure et même davantage.

Plusieurs conditions sont nécessaires pour le bon fonctionnement des surfaces de chauffe des chaudières. Il faut d'abord qu'elles soient effectivement baignées par le courant des gaz chauds ; si certaines parties se trouvent en dehors de ce courant, c'est une surface de chauffe qui figure dans le total des mètres carrés, mais qui n'est guère efficace en réalité. En outre, les deux faces de la tôle doivent être nettes : du côté des gaz, un dépôt de suie ralentit beaucoup la transmission de la chaleur : du côté de l'eau, les dépôts solides, qui se forment sur le métal par suite des sels calcaires que l'eau abandonne, agissent de même, tout en étant moins défavorables à ce point de vue. Mais ces dépôts intérieurs ont un autre inconvénient bien plus grave : dès que leur épaisseur dépasse quelques millimètres, la température de la tôle s'élève notablement, et c'est une cause de dété-

rioration grave. Tant que le métal est en contact avec l'eau, il reste à une température qui ne dépasse pas beaucoup celle de l'eau : par exemple dans les parties les plus chauffées, à 250° environ, avec l'eau à 200° ; cette température n'est pas tout à fait la même dans toute l'épaisseur du métal, et elle augmente avec cette épaisseur.

Au contraire, des tôles recouvertes d'incrustations atteignent des températures nuisibles de 300 ou 400°.

La quantité totale de chaleur reçue par l'eau ne sera pas extrêmement réduite par les dépôts (jusqu'à une certaine limite qu'à aucun point de vue il ne faut dépasser), parce que les gaz arrivent un peu plus chauds sur les parties de la surface de chauffe les plus éloignées du foyer, dont l'activité se trouve augmentée de ce chef. C'est surtout au point de vue de la conservation des tôles que les dépôts sont nuisibles.

Les mêmes effets, avec une intensité plus grande, sont produits par les dépôts graisseux et visqueux qui peuvent quelquefois se former sur les tôles, quand les eaux d'alimentation sont chargées de matières grasses, sucrées ou amidonnées.

Il y a aussi une autre cause, bien connue, qui peut produire la surchauffe des tôles et la réduction de la quantité de chaleur transmise, la présence de vapeur à la place de l'eau, par suite de l'abaissement excessif du niveau : la tôle prend alors une température moyenne entre celle des gaz chauds de la vapeur (par exemple 1 800° et 200°, soit une moyenne de 1 000°). Aussi toute la surface de chauffe doit-elle être refroidie par l'eau ; les appareils surchauffeurs de vapeur, auxquels, par leur destination même, cette règle n'est pas applicable, ne doivent pas être placés en contact avec les gaz les plus chauds.

C'est un phénomène digne de remarque que ce faible échauffement des tôles en contact d'un côté avec des gaz très chauds et de l'autre côté avec de l'eau à une température relativement basse. Il indique que la transmission de

la chaleur des gaz à la tôle est plutôt difficile, mais qu'au contraire la chaleur traverse facilement la tôle et se communique aisément à l'eau. Mais lorsque cette sortie de la chaleur est gênée, soit par des dépôts intérieurs, soit par suite de l'absence de l'eau, alors la tôle s'échauffe indûment.

Le nombre des calories transmises par m^2 et par heure ne paraît pas beaucoup influencé par la nature du métal (fer ou cuivre) ni même par son épaisseur : toutefois la grande épaisseur a l'inconvénient d'exposer le métal à prendre une température moyenne plus élevée. Ce nombre de calories dépend, non pas uniquement de la température des gaz chauds, mais de la différence de température entre les gaz et l'eau; de sorte que, pour une même température des gaz, il augmente si l'eau est plus froide. C'est ce qui a lieu dans les réchauffeurs d'eau d'alimentation. L'eau froide, introduite directement dans une chaudière ordinaire, s'échauffe toujours aux dépens de la chaleur du foyer, mais en se mélangeant à l'eau ou à la vapeur, de sorte que la température de l'eau qui baigne les tôles ne descend guère au-dessous de la température de vaporisation [1]. Sur les derniers mètres carrés de la surface de chauffe d'une chaudière ordinaire, contenant de l'eau à 180°, et chauffés par des gaz à 300°, la transmission est peu active : elle augmente aussitôt si l'eau est à 20°, l'écart des températures des deux côtés de la tôle passant de 120° à 280°.

Le réchauffeur permet de réaliser le *chauffage méthodique* de l'eau, depuis la température initiale jusqu'à celle de vaporisation, l'eau circulant en sens contraire du courant gazeux. La vaporisation se fait ensuite dans la chaudière proprement dite, à température constante. Beaucoup de réchauffeurs n'ont pas un fonctionnement aussi satisfaisant : ils élèvent la température de l'eau d'une certaine quantité, par exemple de 20° à 80°, en utilisant de la chaleur autre-

[1] Réserve faite de l'eau relativement froide qui peut se cantonner au fond de certains types de générateurs.

ment perdue; mais cette eau à 80°, est envoyée dans la chaudière, au lieu d'être chauffée méthodiquement jusqu'a la température de vaporisation.

L'étendue de la surface de chauffe des chaudières s'exprime souvent en fonction de la surface de grille. Mais la même surface de grille peut produire des quantités de chaleur bien différentes. Deux grilles de même étendue brûleront l'une 100 kg par heure et m² au tirage naturel, et l'autre 300 kg au tirage forcé; la seconde est en réalité l'équivalent d'une grille trois fois plus grande que la première, avec la même combustion, et par conséquent la surface de chauffe devrait être trois fois plus grande pour utiliser de même la chaleur produite. Quand on veut tirer du combustible le meilleur parti possible, la surface de chauffe doit être étendue. Au contraire, si l'on recherche la légèreté et le faible encombrement, on sacrifie la partie la moins active de la surface de chauffe.

En général, dans les chaudières fixes marchant au tirage naturel, la surface de chauffe est de 35 à 40 fois la surface de grille. Dans les chaudières à tirage forcé des locomotives, ce rapport est souvent de 75 à 80, ce qui n'est pas une augmentation proportionnelle à la quantité de combustible brûlé.

Un dernier point sur lequel il est utile d'appeler l'attention est la division d'une surface de chauffe totale en surface directe et indirecte. Comme la production horaire du m² de surface directe est beaucoup supérieure à la production moyenne par m² de la surface indirecte, on pense quelquefois qu'il y a intérêt à augmenter la première aux dépens de la seconde : au seul point de vue de la transmission de la chaleur, cette répartition n'a pas grande importance : ce qui n'est pas pris par la surface directe est reçu par la surface indirecte, et le total ne varie guère. L'augmentation de surface directe peut être intéressante à un autre point de vue, car elle se concilie avec une grande chambre de combustion au-dessus de la grille, favorable à un bon emploi du com-

bustible. Inversement, une chaudière placée très près de la grille peut nuire à la production de chaleur, en refroidissant les gaz avant leur combustion complète.

105. Classification des chaudières. — Les chaudières peuvent se ranger pour la plupart en trois grandes catégories : les chaudières à *grands corps*, où l'eau est contenue dans des récipients en tôle relativement vastes ; les chaudières à *tubes de fumée*, où les gaz chauds traversent des tubes baignés dans l'eau [1] ; les chaudières à *tubes d'eau*, où les tubes sont chauffés par l'extérieur. Quelques générateurs sont mixtes et ne rentrent pas uniquement dans une de ces trois catégories.

Les principaux éléments à considérer dans une chaudière sont la surface de grille (généralement comptée en projection horizontale quand elle est inclinée) ; la surface de chauffe ; la pression maxima. Il est intéressant aussi de noter la capacité de la chaudière, divisée en volume d'eau et volume de vapeur, ainsi que la surface du plan d'eau. La variation possible du volume de l'eau est aussi un élément intéressant à considérer.

106. Grands corps et foyer extérieur. — La chaudière à grand corps la plus simple est un cylindre, à fonds hémisphériques ou bombés ; cette forme ne donne qu'une faible surface de chauffe pour un grand volume. Le cylindre est horizontal ou vertical ; la chaudière verticale, autrefois adoptée pour utiliser les flammes perdues des fours à puddler ou à réchauffer, a donné lieu à des accidents fort graves.

On augmente la surface de chauffe des générateurs cylindriques en leur ajoutant des cylindres de plus petit diamètre qu'on appelle *bouilleurs*. La liaison du corps principal et du

[1] On appelle souvent ces chaudières *tubulaires*, mais cette expression est devenue ambiguë, depuis la construction des chaudières également formées de tubes, mais avec la disposition inverse, eau dans les tubes.

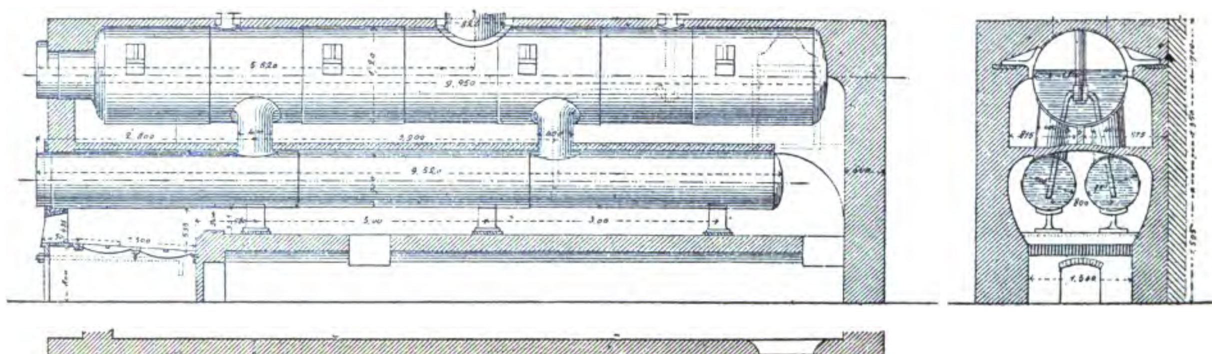
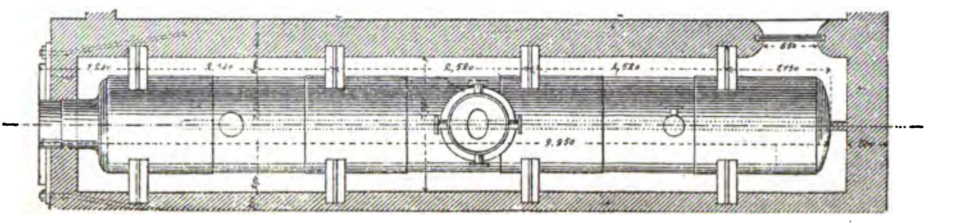



Fig. 209. — Chaudière à deux bouilleurs, directement chauffés.

bouilleur se fait à l'aide de *cuissards* à deux collerettes

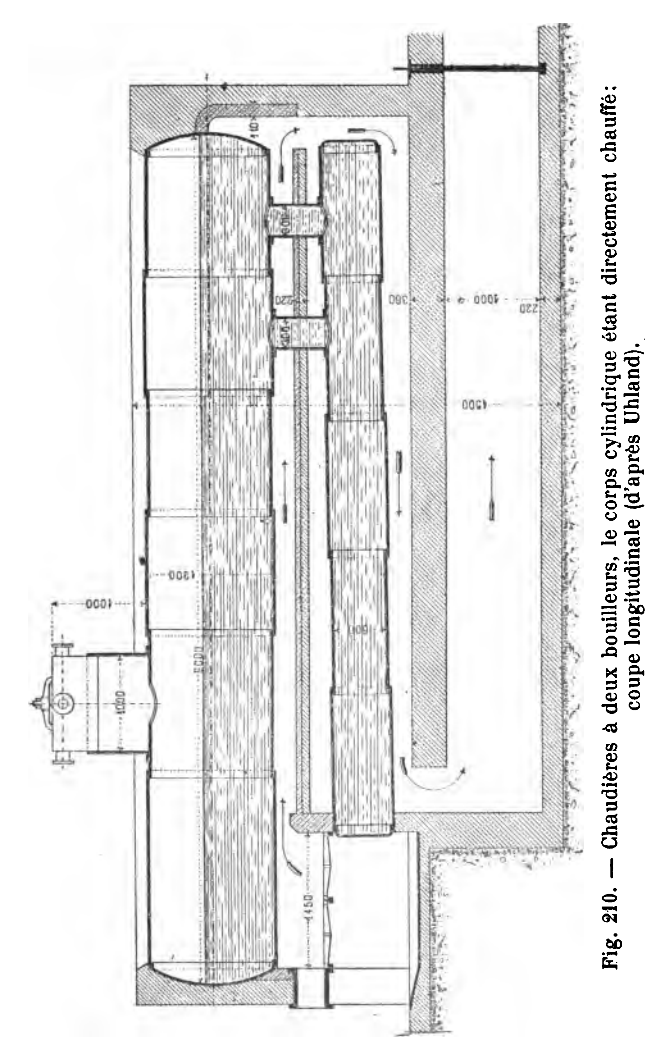


Fig. 210. — Chaudières à deux bouilleurs, le corps cylindrique étant directement chauffé: coupe longitudinale (d'après Uhland).

embouties, formés souvent d'une tôle soudée sur elle-même.

Les bouilleurs sont destinés à être toujours pleins d'eau et sont chauffés sur toute leur surface : ils ne doivent donc présenter aucune partie pouvant former une *chambre de vapeur*. Si le bouilleur est incliné, il doit se trouver un cuissard à l'extrémité la plus élevée.

La chaudière à bouilleurs est très répandue en France : avant la récente extension des générateurs à tubes d'eau, on la voyait dans la plupart des établissements industriels.

Une disposition fréquente consiste à chauffer directement les bouilleurs au-dessus de la grille (fig. 209), en

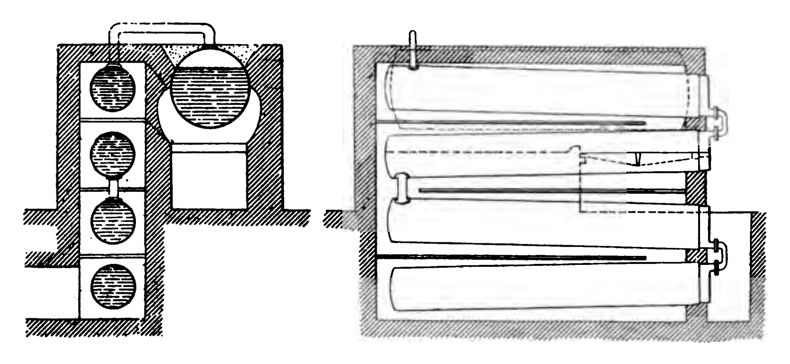


Fig. 211. — Chaudières à bouilleurs, avec bouilleurs réchauffeurs latéraux : les gaz chauds circulent d'abord sous le corps principal, puis successivement autour de chaque bouilleur.

exposant ainsi au *coup de feu* la partie la plus facile à remplacer.

Parfois c'est le corps principal qu'on chauffe directement, en plaçant les bouilleurs dans les carneaux (fig. 210). On peut alors faire entrer l'eau d'alimentation à l'extrémité du bouilleur la moins chauffée et réaliser un chauffage méthodique par circulation de l'eau en sens contraire du mouvement des gaz. Les bouilleurs sont parfois latéraux (fig. 211). Les derniers bouilleurs ne sont plus que des réchauffeurs.

Les gaz sont guidés dans leurs circuits par des murettes

et des voûtes en briques. Les fissures de cette maçonnerie permettent des passages directs de gaz chauds vers la cheminée, ou des rentrées d'air qui refroidissent inutilement le courant[1].

Les grands massifs de maçonnerie ne s'échauffent que lentement, et absorbent une forte quantité de chaleur : ils ne conviennent donc pas si les allumages sont fréquents et lorsqu'on veut une mise en pression rapide. Par contre, ils ont l'avantage de maintenir la chaudière chaude pendant des arrêts de quelques heures. Tout compte fait, la déperdition de chaleur par les maçonneries paraît assez considérable.

Il faut démolir en grande partie les massifs lorsqu'on veut examiner sérieusement l'extérieur de toutes les tôles : la dépense et la gêne qui en résultent font souvent espacer par trop ces examens.

107. Grands corps et foyers intérieurs. — La chaudière la plus simple à foyer intérieur est celle de *Cornouailles* (fig. 212), très usitée en Angleterre. Le foyer est placé à l'entrée d'un cylindre, qui traverse de part en part la chaudière. Les gaz chauds circulent ensuite à l'extérieur du grand corps cylindrique. La surface de chauffe est à peu près la même que celle d'une chaudière à foyer extérieur, munie d'un bouilleur de même diamètre que le foyer intérieur.

La chaudière de *Lancashire* a deux foyers disposés parallèlement à l'intérieur d'un cylindre unique, comme le montre la figure 213 du côté gauche (il faudrait supposer les deux foyers cylindriques prolongés jusqu'à l'extrémité de droite, au lieu d'être réunis en un tube unique).

Dans la chaudière *Galloway* (fig. 213) les deux tubes foyers se réunissent en un seul, à section déprimée, que

[1] Ces rentrées d'air se constatent par l'analyse des gaz auprès de l'autel et à la base de la cheminée.

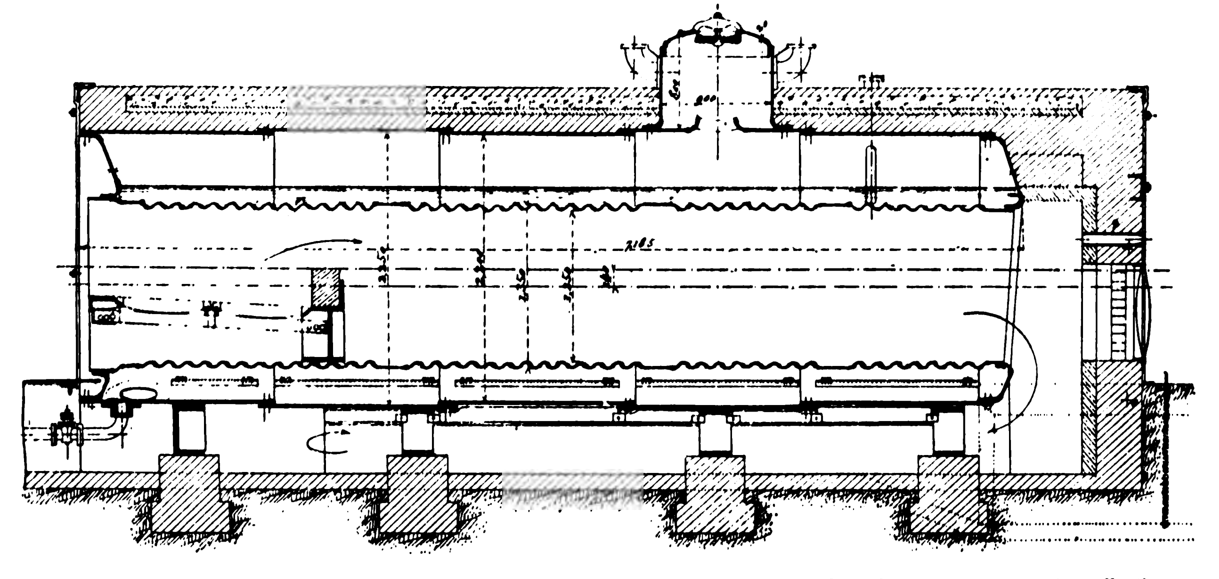


Fig. 212. — Chaudière de Cornouailles à foyer intérieur ondulé, construite par Knaudt, pour une pression effective de 12 kg par cm². Coupe longitudinale.

traversent de nombreux tubes tronconiques (fig. 214).
En comparant des chaudières équivalentes, à foyers inté-

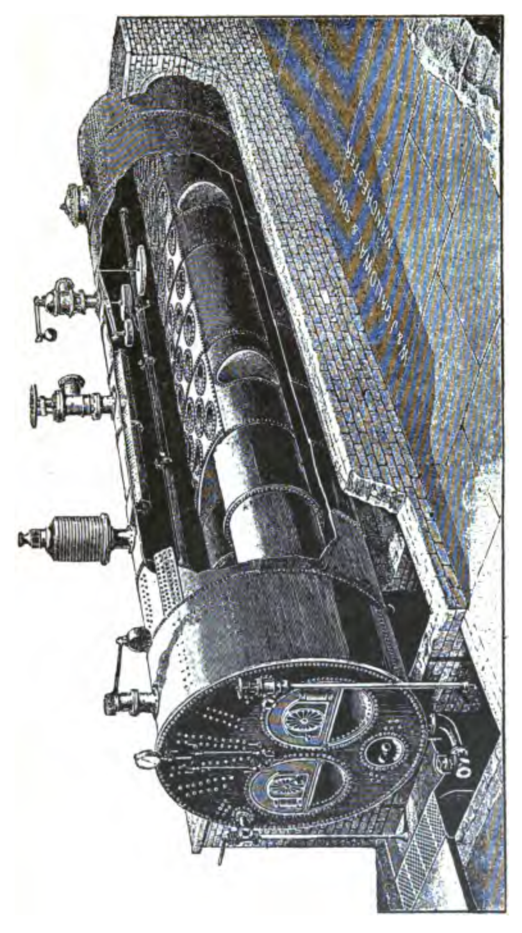


Fig. 213. — Chaudière Galloway.

rieurs et à foyers extérieurs, on voit que l'installation des premières est plus simple et qu'elles exigent moins de maçonneries ; les pertes de chaleur autour du foyer sont

réduites ; les courts circuits des gaz à travers les maçonneries sont moins à craindre. Par contre, la largeur de la grille est souvent un peu trop restreinte ; il en est de même de la hauteur libre au-dessus de la grille : il est vrai que les gaz trouvent une chambre de combustion au delà de l'autel. Très bonnes avec certains combustibles, tels que les houilles flambantes, ces chaudières se prêtent mal à l'emploi des menus maigres.



Fig. 214. — Tube Galloway.

L'alimentation doit être l'objet d'une attention soutenue, car l'abaissement du plan d'eau laisse le ciel du foyer exposé à la chaleur la plus vive.

Quand on allume ces chaudières, l'eau reste froide longtemps à la partie inférieure en dessous des foyers, quelquefois pendant plusieurs heures, bien que le fond soit chauffé par les gaz dans leur trajet vers la cheminée. Les tôles de la chaudière, chaudes en haut et froides en bas, se dilatent inégalement, ce qui les fait cintrer suivant la longueur et fatigue les rivures. Pour atténuer cet inconvénient, une mise en pression lente est à recommander.

108. Chaudières à tubes de fumée. — Créé par Séguin en 1827 pour la locomotive (voy. § 10), le générateur à tubes de fumée est, en outre, d'un usage fréquent dans la marine; on l'emploie aussi dans les locomobiles et dans des installations fixes.

Les parties essentielles de la chaudière ordinaire de locomotive (fig. 215) sont le *foyer*, en cuivre ou en acier (construction américaine), la *boîte à feu*, qui l'enveloppe, le *corps cylindrique*, traversé par les *tubes*, qui débouchent dans la *boîte à fumée*. Grâce au tirage forcé produit par la vapeur d'échappement, on arrive à brûler 500 kg de houille, et même davantage, par heure et m² de grille, et on obtient une

abondante production de vapeur dans une chaudière dont

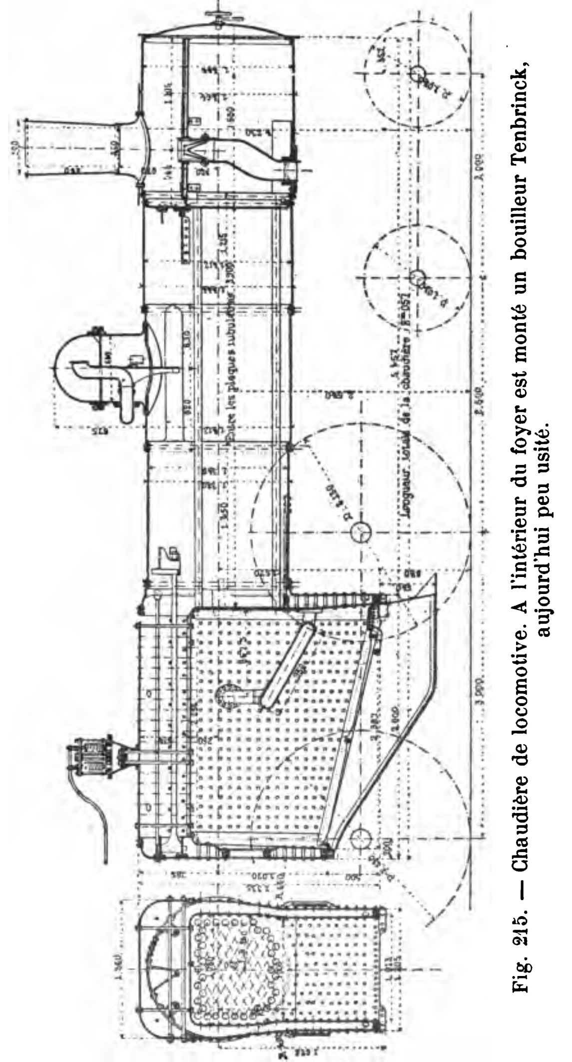


Fig. 215. — Chaudière de locomotive. A l'intérieur du foyer est monté un bouilleur Tenbrinck, aujourd'hui peu usité.

la surface de grille est généralement comprise entre 2 et

3 m² et dont la surface de chauffe dépasse rarement 220 m² [1].

Les formes et les proportions des diverses parties de la chaudière sont commandées par les nécessités de leur installation sur la locomotive.

Les faces parallèles du foyer et de la boîte à feu sont reliées par des entretoises en cuivre ou en acier doux ; ce dernier métal est employé surtout en Amérique. C'est la consolidation du ciel de foyer qui donne lieu aux détails de construction les plus variés ; il est raidi par des armatures longitudinales ou transversales, rattachées ou non au berceau cylindrique de la boîte à feu, ou bien il est directement entretoisé avec la boîte à feu [2].

Les locomobiles et les machines demi-fixes ont souvent une chaudière analogue à celle des locomotives. On emploie aussi ce même type de générateur pour des installations fixes. La mise en place en est commode mais la complication de formes n'est pas alors bien justifiée. Aussi des types d'exécution plus facile sont en général préférés, notamment la chaudière à bouilleurs dite *semi-tubulaire* (fig. 216) ; les deux bouilleurs sont directement chauffés par le foyer, puis par les gaz chauds, qui circulent ensuite autour du grand corps cylindrique, et enfin à travers les tubes.

La figure 217 représente une chaudière du type Tischbein, très répandu en Allemagne, à foyer intérieur et surmontée d'un corps tubulaire. Parfois, comme c'est le cas de la figure, il y a deux niveaux d'eau différents, le corps inférieur n'étant pas complètement rempli. La règle qui consiste à soustraire à l'action de la chaleur les tôles en contact avec la vapeur n'est pas observée : mais le corps inférieur est chauffé extérieurement par les gaz qui ont traversé les tubes et se rendent à la cheminée, gaz qui doivent être suffisam-

[1] Il s'agit ici des proportions courantes en Europe. Certaines locomotives américaines ont des dimensions bien plus grandes.

[2] Pour plus de détails sur la chaudière de locomotive et ses dispositions diverses voir « La machine locomotive », par Ed. Sauvage, 4 éd. (Paris, 1904, Béranger).

ment refroidis pour que cette dérogation à la règle n'ait pas d'inconvénients.

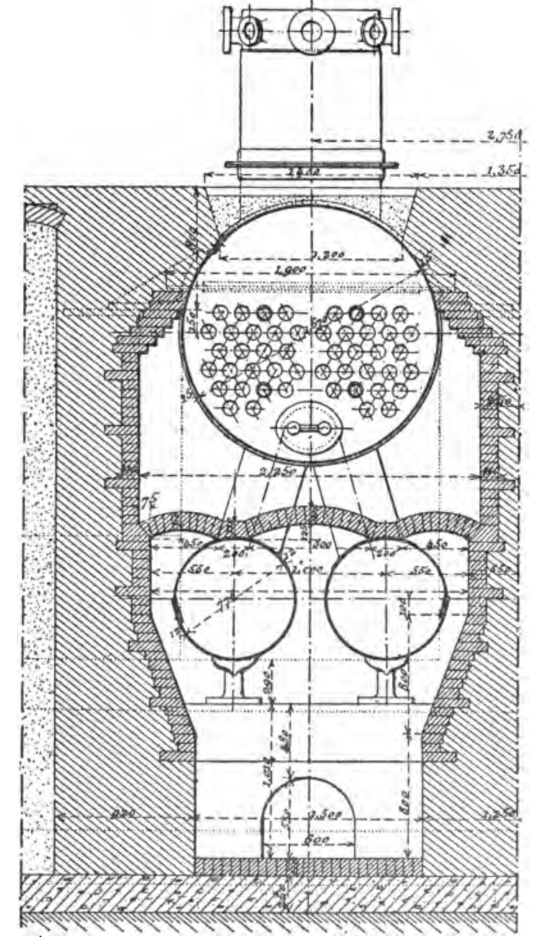


Fig. 216. — Chaudière à bouilleurs, semi-tubulaire ; coupe transversale.

L'eau d'alimentation est envoyée dans le corps supérieur;

dès qu'elle y dépasse son niveau normal, elle tombe, par un tube vertical, dans le corps inférieur, où une alimentation de secours permet l'envoi direct de l'eau. Un gros tube vertical donne issue à la vapeur produite dans le corps infé-

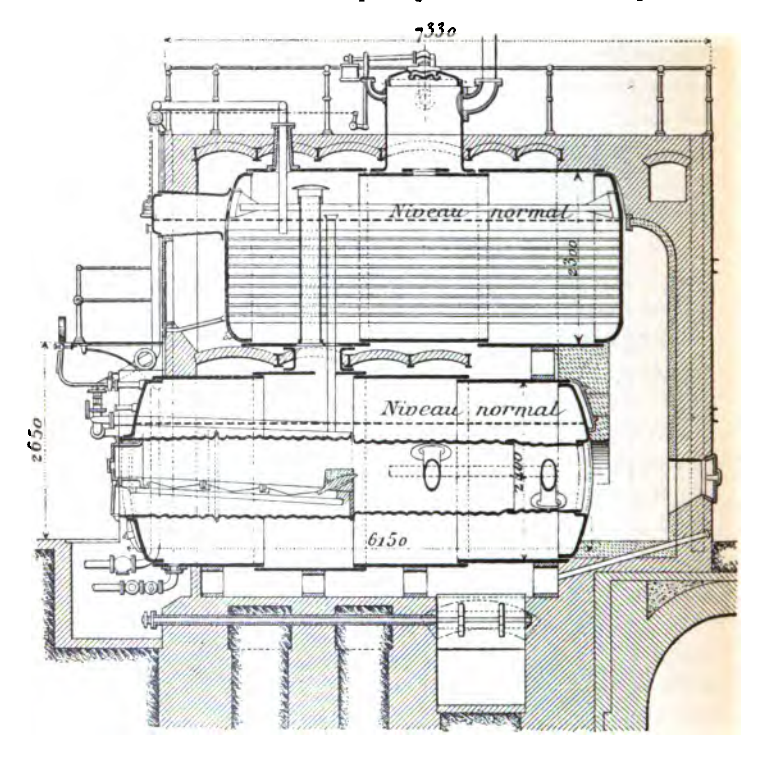


Fig. 217. — Chaudière du type Tischbein, avec deux niveaux d'eau.

rieur. Le corps supérieur sert principalement de réchauffeur et la vaporisation y est peu active.

On peut aussi installer des tubes dans le prolongement du foyer cylindrique d'une chaudière de Cornouailles, en raccourcissant d'autant ce foyer. Une combinaison analogue se voit dans la chaudière Farcot (fig. 218), disposée pour per-

mettre le retrait assez facile du foyer et des tubes, en démontant les boulons de deux grands joints à bride, portant sur des cornières aux deux extrémités du corps cylindrique inférieur.

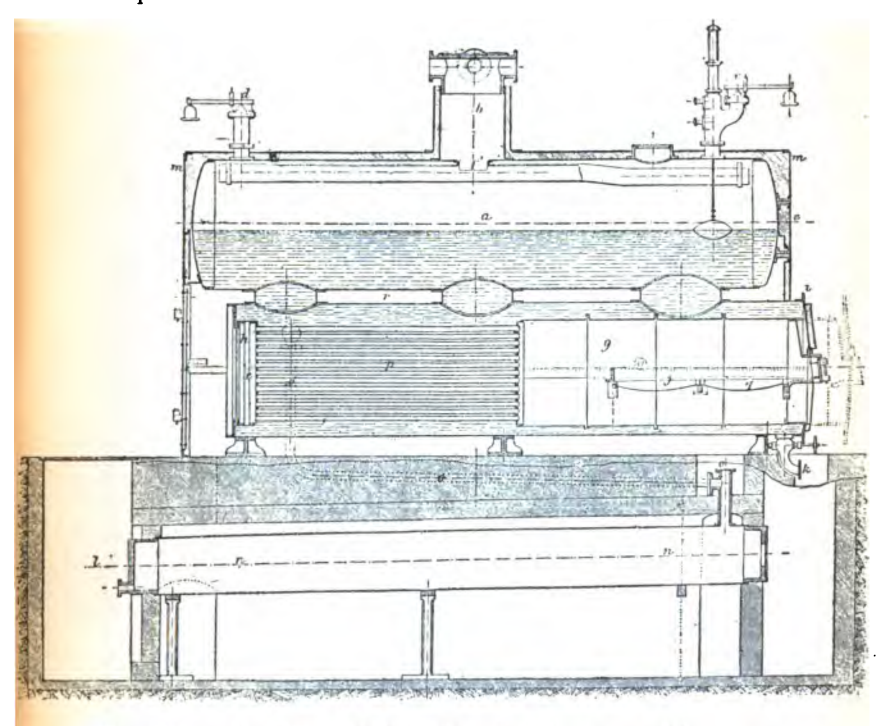


Fig. 218. — Chaudière tubulaire Farcot, à foyer amovible, avec bouilleur réchauffeur *nn*; coupe longitudinale.

Le foyer intérieur peut aussi communiquer avec une chambre, d'où les tubes partent *en retour* (fig. 219) : une boîte à fumée en tôle entoure la porte de chargement. Tout le système interne adhère seulement au fond antérieur de la chaudière, de sorte que les dilatations en sont assez libres.

En rattachant le fond de la chaudière au corps cylindrique par un grand joint à brides, facile à démonter, on

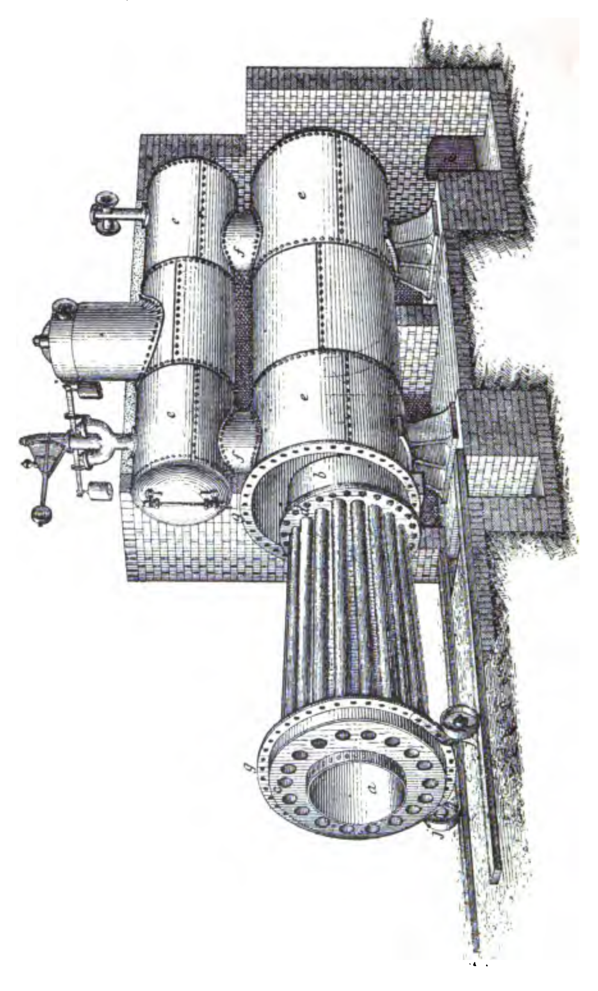


Fig. 219. — Chaudière tubulaire, à foyer amovible, de la Société de Pantin ; vue avec le foyer démonté et sorti de la *calandre c* : *a*, foyer cylindrique, contenant la grille ; *b*, boîte à feu, d'où partent les tubes en retour, entourant le foyer et débouchant dans une boîte à fumée extérieure (non figurée sur le dessin), fixée contre la façade de la chaudière.

permet la visite et le nettoyage du faisceau intérieur, sujet à l'entartrement.

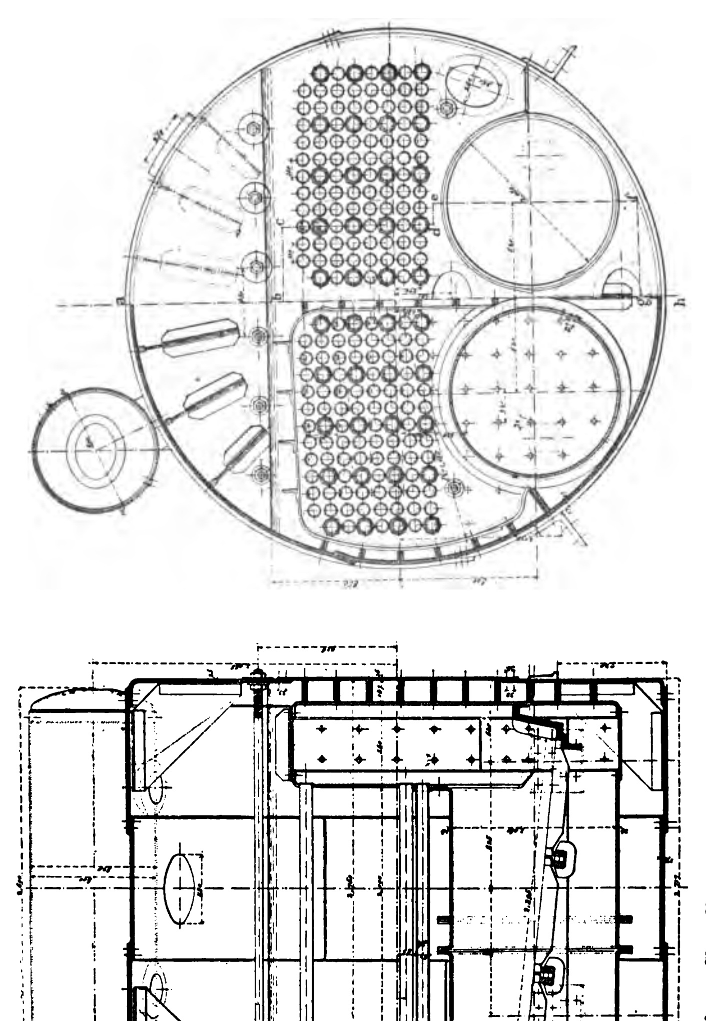


Fig. 220. — Chaudière marine à deux foyers; les foyers sont en tôle lisse, à bords relevés; un certain nombre de *tubes tirants* sont vissés dans les plaques et maintenus par des écrous.

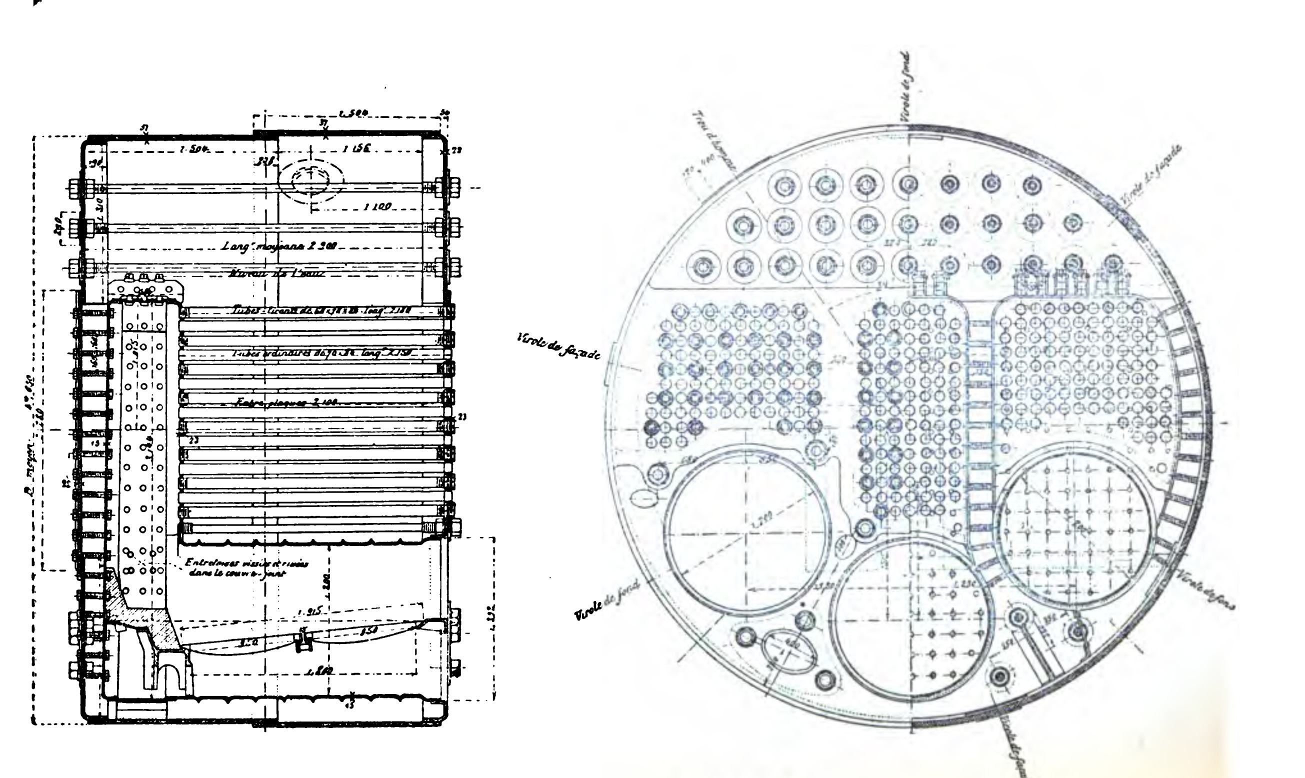


Fig. 221. — Chaudière marine à trois foyers ;
coupe longitudinale ; demi-coupe transversale et demi-élévation (sans boîtes à fumée et enveloppes).

Pour les chaudières marines, on est arrivé à un type en quelque sorte classique, avec foyers cylindriques intérieurs, surmontés de tubes en retour, le tout placé dans un grand cylindre avec deux fonds plats; la distance entre les faces

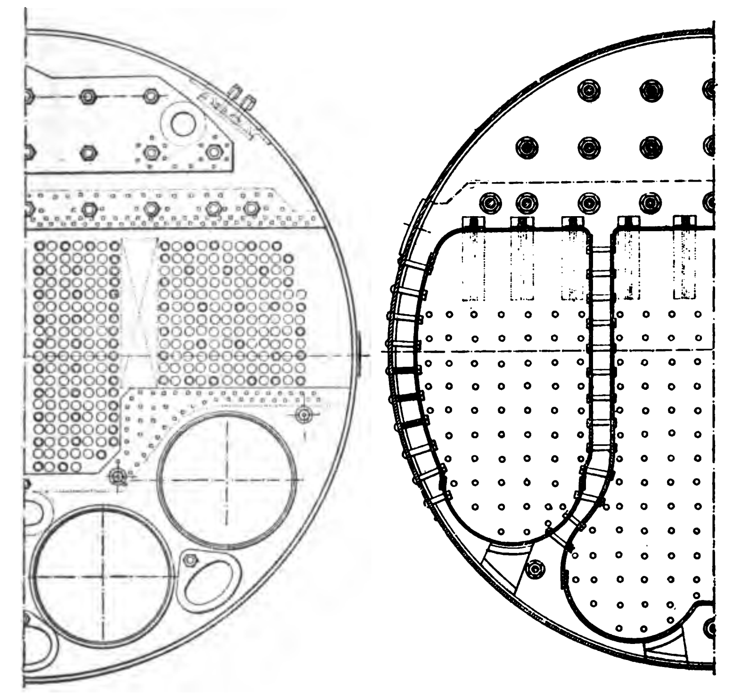


Fig. 222. — Chaudière marine à quatre foyers; demi-élévation et demi-coupe transversale par les boîtes à feu.

planes est souvent inférieure au diamètre. Cette chaudière est parfois désignée par le nom de *chaudière écossaise.*

Le foyer et les tubes s'emmanchent sur des *boîtes à feu* ou *chambres de combustion,* dont les parois sont entretoisées entre elles, avec la surface cylindrique extérieure et avec le fond plat de la chaudière.

De petites chaudières peuvent n'avoir qu'un foyer; sou-

vent elles en ont deux (fig. 220) et trois (fig. 221); quelquefois une seule chaudière contient quatre foyers (fig. 222). Ces foyers, pour les hautes pressions, sont à profil ondulé du système Fox ou autre analogue, beaucoup plus résistant que le cylindre uni.

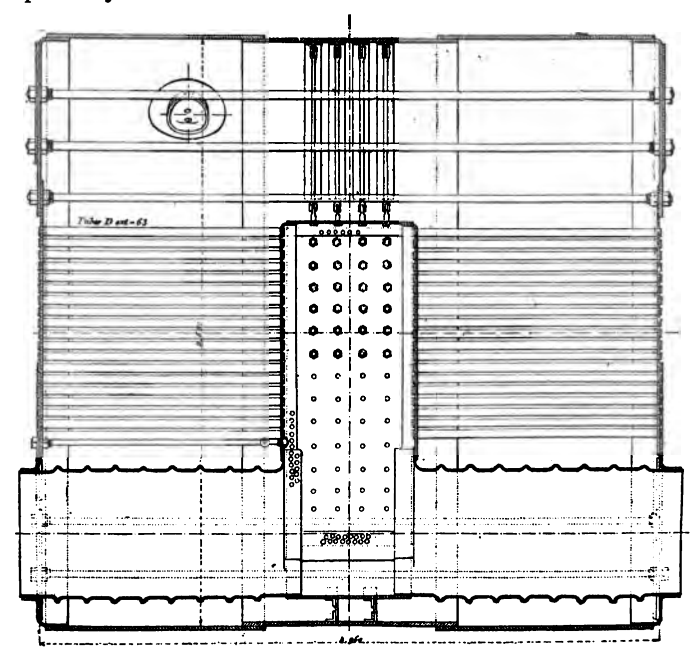


Fig. 223. — Chaudière double, à quatre foyers sur chaque face, avec boîtes à feu communes aux foyers opposés.

En accolant dos à dos deux de ces chaudières, on peut supprimer les fonds qui se touchent, et même les parois voisines des boîtes à feu (fig. 223). On obtient ainsi les *chaudières doubles*, avec portes de chargement sur les deux faces opposées.

Le diamètre des chaudières marines atteint et dépasse 5 m. Aussi, avec les fortes pressions de 12 et 14 kg par cm^2,

arrive-t-on à des épaisseurs de tôle de 30 et 40 mm, bien qu'on fasse travailler le métal à une charge assez forte par mm². Pour les foyers intérieurs, ce n'est pas sans inconvénient qu'on dépasse le diamètre de 1 m; c'est pourquoi on préfère souvent quatre foyers de petit diamètre à trois plus grands.

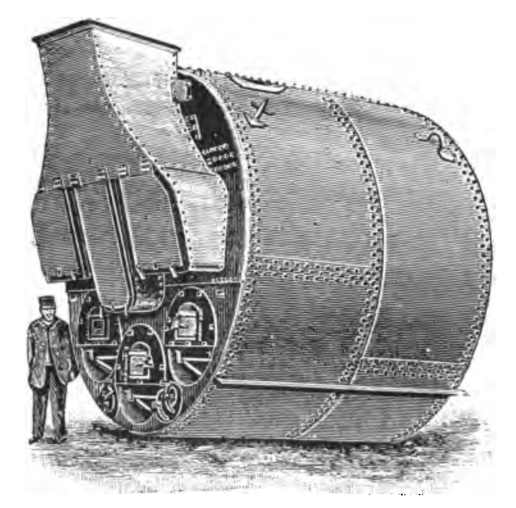


Fig. 224. — Chaudière marine à trois foyers, avec les boîtes à fumée en place.

Les boîtes à fumée, munies de portes de visite, sont rapportées devant le débouché des tubes, sur la façade de la chaudière, au-dessus des portes de foyer (fig. 224). Des conduits en tôle raccordent les boîtes à fumée à la cheminée.

109. Tubes de fumée. — Le diamètre intérieur des tubes est de 40 à 45 mm dans les chaudières de locomotives, et de 60 à 80 dans les chaudières marines et les grandes chaudières fixes. Ils sont en fer ou en acier doux. Pendant longtemps on a employé le laiton, souvent avec un bout soudé en cuivre rouge du côté du foyer.

Comme c'est la surface de chauffe en contact avec les gaz du foyer, beaucoup plus que celle baignée par l'eau, qui détermine la quantité de chaleur absorbée par la chaudière, on a augmenté la première surface en munissant les tubes d'ailettes intérieures (fig. 225). Certaines expériences ont montré que la surface de chauffe ainsi obtenue avec des ailettes était aussi efficace que la même surface de tubes lisses. Il convient que le diamètre intérieur de ces tubes à ailettes ne descende pas au-dessous de 60 ou 65 mm, pour éviter l'obstruction par les escarbilles.

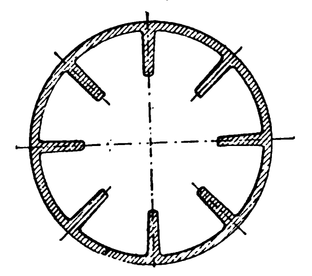


Fig. 225. — Coupe d'un tube à ailettes.

Sur la plaque tubulaire, les centres des tubes sont rangés en lignes droites; les centres de deux rangées voisines sont alternés de manière à former une série de triangles équilatéraux (c'est du moins la disposition usuelle dans les locomotives). L'épaisseur de métal ne doit pas être trop réduite entre deux trous (par exemple ne pas descendre au-dessous de 20 mm pour des trous de 50 mm). Les rangées de tubes sont horizontales ou verticales, cette dernière disposition paraissant faciliter le dégagement de la vapeur. Dans les chaudières marines, les tubes forment souvent à la fois des rangées verticales et horizontales.

Les tubes doivent être ramonés très fréquemment, soit avec un écouvillon, soit à l'aide d'un jet de vapeur envoyé par une lance à tuyau flexible.

L'assemblage des tubes dans les deux plaques tubulaires est une opération d'importance capitale : on a heureusement pu obtenir des joints étanches par des moyens très simples. On applique fortement le tube, en l'évasant, contre la paroi du trou percé dans la plaque. Cette opération se fait à l'aide de l'outil appelé, du nom de son inventeur, *dudgeon;* il consiste en galets entraînés par une broche centrale, légère-

ment conique, qu'on fait tourner, tout en l'enfonçant progressivement pour écarter les galets. Pour correspondre exactement au dudgeon, le trou est également conique. Toutefois, quand la tenue des tubes n'est pas exceptionnellement difficile, on obtient un montage suffisant avec un trou cylindrique.

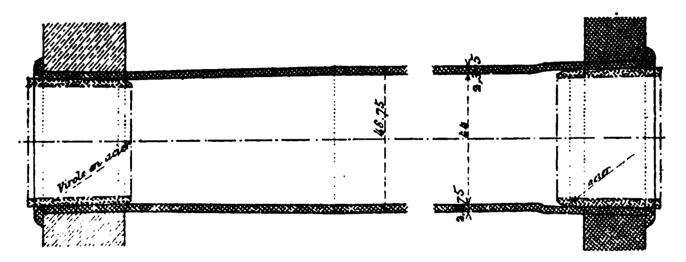


Fig. 226. — Montage de tube de chaudières des locomotives des chemins de fer de l'Est; le tube, rétréci du côté du foyer, est agrandi du côté de la boîte à fumée. La bague ou virole est appliquée habituellement du côté du foyer (à gauche) seulement.

Le montage est complété d'habitude par une rivure ou un sertissage du tube formant un bourrelet extérieur (fig. 226). Une *bague* ou *virole* conique enfoncée à l'entrée du tube, consolide l'assemblage et permet de le resserrer au besoin. On peut souvent se dispenser d'en placer, surtout à l'extrémité de sortie des gaz.

Les tubes sont des tirants qui entretoisent les plaques tubulaires; dans les chaudières marines, certains tubes, plus gros que les autres, sont vissés dans les plaques ou serrés par des écrous; on les nomme *tubes-tirants*. Il faut remarquer que les tubes se dilatent plus que l'enveloppe extérieure et commencent par pousser les plaques avant de les maintenir : ce n'est qu'après le bombement de ces plaques qu'ils peuvent travailler comme tirants.

Les tubes *Bérendorf*, employés dans certaines chaudières fixes, ont un simple emmanchement conique aux deux bouts, de manière à être facilement démontables, les cônes des deux

extrémités étant dirigés dans le même sens. Une plaque de sûreté les maintient en place quand la chaudière est en pression.

110. Chaudières à tubes d'eau : tubes rectilignes. — En plaçant l'eau à l'intérieur des tubes, on rend inutile le grand corps de chaudière que traversent les tubes à fumée. Par contre, les pièces qui raccordent les extrémités des tubes d'eau sont souvent compliquées. Le volume d'eau peut être réduit, ce qui active la mise en pression et diminue les effets mécaniques d'une explosion [1].

Les dispositions de ces chaudières sont très variées; on peut ranger dans une première catégorie celles qui sont composées de tubes rectilignes, généralement assez gros (8 à 10 cm de diamètre extérieur).

Les tubes de la chaudière Belleville (fig. 227) font communiquer le *collecteur* inférieur C et le *collecteur* supérieur G. Ils sont assemblés en un certain nombre d'*éléments*. Chacun de ces éléments se compose de deux rangées verticales de tubes, formant une conduite unique repliée sur elle-même. Le premier tube part du collecteur inférieur; les différents tubes de l'élément communiquent par des boîtes de raccord. dans lesquelles ils sont vissés; le dernier tube débouche dans le collecteur supérieur. Un certain nombre d'éléments pareils sont disposés au-dessus de la grille, aussi longue que les tubes. La grille et les tubes qui la recouvrent sont installés dans une enceinte en cornières et en tôles garnies de briques. Les communications des tubes se trouvent en dehors du courant chaud.

Les deux collecteurs sont réunis extérieurement par un conduit vertical. En outre, un récipient vertical communique par de petits tuyaux avec le haut et le bas de la chaudière. Ce récipient porte un tube indicateur au niveau de l'eau, et renferme un flotteur qui règle automatiquement l'alimenta-

[1] Ces chaudières à tubes d'eau sont parfois dites *multitubulaires*.

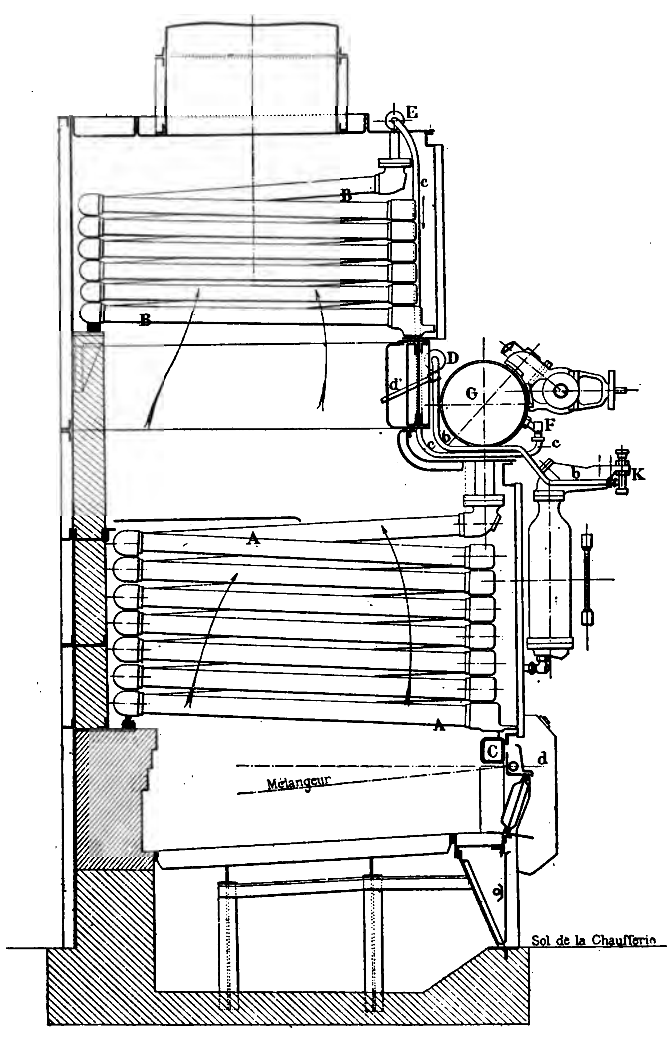


Fig. 227. — Générateur Belleville, avec réchauffeur d'eau d'alimentation. La chaudière proprement dite est formée des *éléments* AA, entre les *collecteurs* C et G, réunis en outre par un tube de communication extérieur, non visible sur la figure, qui montre le récipient portant le tube de niveau d'eau et contenant le flotteur régulateur d'alimentation. Les tubes supérieurs BB constituent un réchauffeur. Le tuyau *d* peut donner des jets de vapeur pour mélanger l'air et les gaz combustibles.

tion. Le niveau de l'eau dans ce récipient est en dessous des rangées supérieures de tubes.

Le conduit vertical qui réunit les deux collecteurs est prolongé à sa partie inférieure pour former un *déjecteur*, destiné à recueillir les dépôts solides abandonnés par l'eau d'alimentation, qui pénètre au milieu de la vapeur, dans le collecteur supérieur. Un robinet d'extraction permet de faire écouler les dépôts boueux. Il importe, en effet, de réduire autant que possible les incrustations dans les tubes. Des bouchons démontables, montés sur les boîtes de raccord, permettent de racler l'intérieur des tubes pour enlever ces incrustations.

La vapeur, qui se forme surtout dans les tubes inférieurs, les plus chauffés, doit parcourir tous les tubes de l'élément avant de se dégager dans le collecteur supérieur. La présence de la vapeur dans les tubes les expose à souffrir de la chaleur, quand on force par trop la production. Cependant les générateurs Belleville sont très répandus et fonctionnent depuis longtemps d'une manière satisfaisante.

Des chicanes en tôle, dans le collecteur, sont destinées à séparer de la vapeur l'eau entraînée. En outre, on réduit la pression à l'aide d'un détendeur; souvent aussi la vapeur traverse un faisceau de tubes sécheurs, sur le parcours des gaz chauds.

Pour activer la combustion, on fait usage de petits jets de vapeur entraînant une lame d'air au-dessus de la grille. Des ouvertures dans les parois extérieures permettent le ramonage des tubes à l'aide d'une lance à jet de vapeur. Un registre automatique, commandé par un piston pressé par la vapeur, modifie le tirage suivant la pression.

Dans les autres chaudières formées de gros tubes rectilignes, les tubes ne sont pas réunis de manière à constituer des circuits; ils sont traversés par des courants parallèles et distincts. Dans chaque élément du générateur Belleville, les tubes sont montés *en tension*, tandis que les collecteurs

de la plupart des autres types sont réunis par tubes groupés *en quantité*. Par suite de cette disposition, les tubes sont tous inclinés dans le même sens; ils sont habituellement plus longs que dans le générateur Belleville ; la grille n'existe que sous la partie antérieure du faisceau de tubes ; des chicanes dirigent les gaz chauds autour des tubes, en empêchant l'écoulement direct vers la cheminée.

Les pièces, qui établissent la communication entre les tubes, sont tantôt de petits raccords séparés, comme dans le générateur Belleville, tantôt des conduits sur lesquels se branchent tous les tubes d'une rangée verticale; enfin tous les tubes peuvent s'assembler, à chaque extrémité, sur une sorte de caisse plate en tôle, dont les deux faces planes sont entretoisées.

Des tampons démontables permettent la visite intérieure de chaque tube; des ouvertures dans l'enveloppe extérieure en maçonnerie servent au ramonage de leurs surfaces extérieures à l'aide d'un jet de vapeur.

Souvent la dimension du collecteur supérieur est assez grande : il constitue un corps cylindrique à moitié plein d'eau; tantôt il est complètement soustrait à l'action des gaz chauds; d'autres fois il est chauffé par les gaz qui ont traversé le faisceau de tubes.

On désire généralement obtenir dans ces générateurs une circulation d'eau active, qui augmente la production de vapeur et maintient toujours les appareils à une température relativement basse. Si au contraire l'eau ne circule pas d'une manière continue, la vapeur forme des sortes de poches et se dégage difficilement par les communications souvent étroites des tubes; l'eau vient remplacer la vapeur par intermittences, tandis qu'un courant d'eau rapide se charge de bulles de vapeur en proportion régulière. Beaucoup de chaudières de ce genre peuvent se ramener à deux types principaux : dans le premier type (fig. 228), les tubes inclinés communiquent, par leur extrémité la plus

basse, avec un collecteur inférieur, et par leur autre extrémité, avec le collecteur supérieur; les deux collecteurs sont reliés en outre par un ou deux gros tubes de retour, non chauffés. Dans le second type, le collecteur inférieur n'existe plus (fig. 229); les tubes communiquent de même par leurs deux bouts avec le collecteur supérieur. La pre-

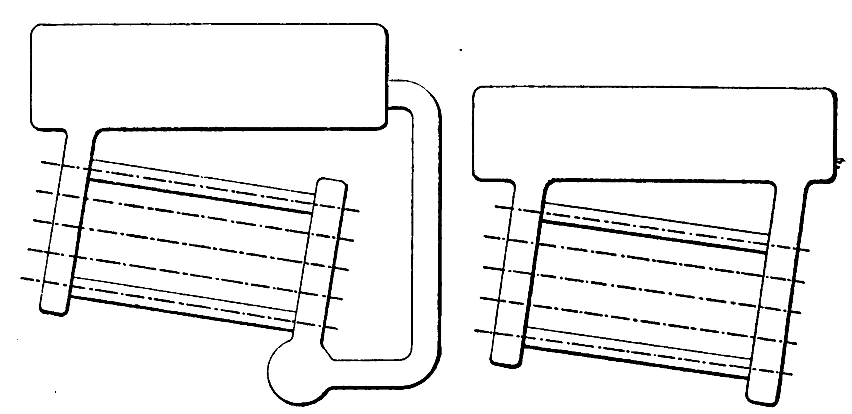


Fig. 228. — Chaudière à tubes d'eau avec collecteur inférieur et tube de retour.

Fig. 229. — Chaudière à tubes d'eau sans collecteur inférieur ni tube de retour.

mière disposition a pour objet de mieux assurer l'arrivée de l'eau dans les tubes inférieurs, les plus chauffés.

La circulation de l'eau dans les chaudières a donné lieu à de nombreuses discussions. En général, l'eau et la vapeur s'élèvent dans les parties chauffées, et le courant d'eau descendant se fait par des communications peu ou pas chauffées. Il convient que les sections de passage soient en chaque point suffisantes, mais sans excès. On doit éviter autant que possible les coudes brusques, qui opposent une résistance au mouvement des fluides.

Dans certains cas, la circulation se fait bien tant que la production n'est pas forcée au delà d'une certaine limite; mais avec une vaporisation plus active, la circulation

s'arrête, la vapeur se dégage en sens inverse du courant,

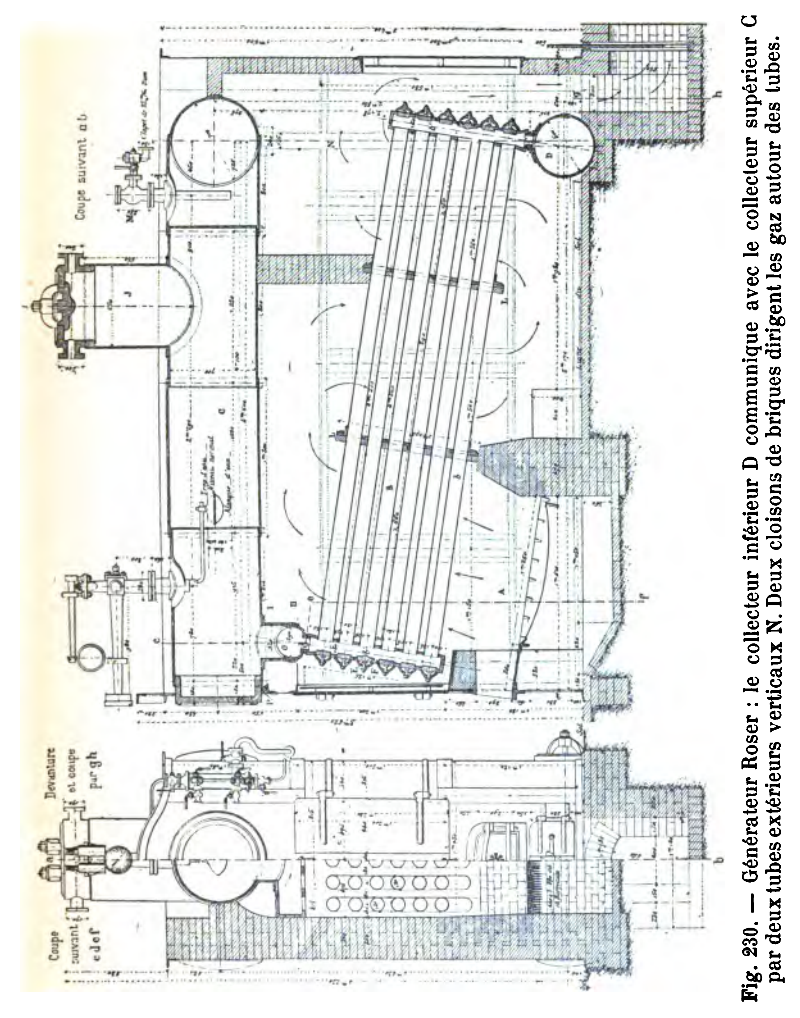


Fig. 230. — Générateur Roser : le collecteur inférieur D communique avec le collecteur supérieur C par deux tubes extérieurs verticaux N. Deux cloisons de briques dirigent les gaz autour des tubes.

et certains tubes, momentanément vides d'eau, sont exposés à atteindre une température beaucoup trop élevée.

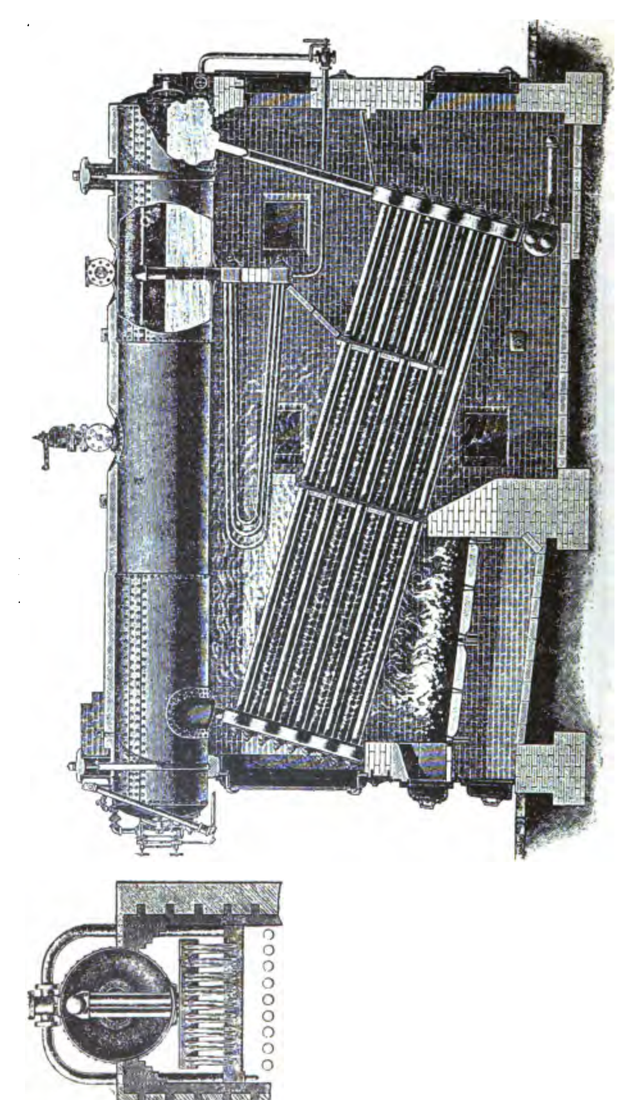


Fig. 231. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec surchauffeur de vapeur, placé entre le premier et le second passage des gaz chauds sur les tubes vaporisateurs.

La figure 230 donne un exemple de chaudière avec collecteur inférieur et tubes de retour extérieurs.

Les tubes du générateur Babcock et Wilcox (fig. 231) communiquent directement par leurs deux bouts avec le collec-

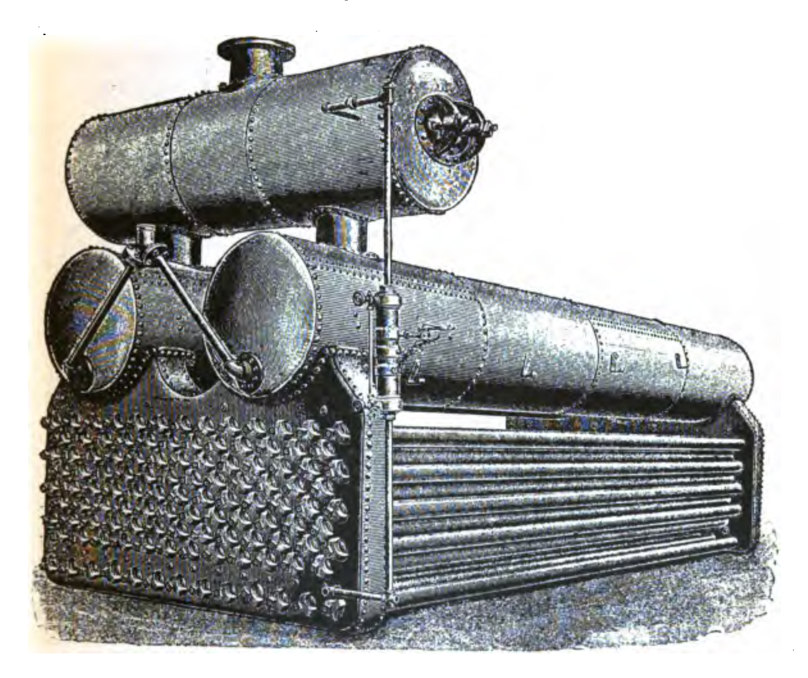


Fig. 232. — Chaudière Heine, avec 140 tubes de 4,900 m sur 90 mm de diamètre.

teur supérieur. Il en est de même dans le générateur Heine (fig. 232), où la communication se fait par deux caisses plates ou lames d'eau; les deux grandes faces parallèles de chaque caisse sont réunies par des entretoises placées entre les tubes.

Les chaudières de cette catégorie sont employées sur mer, principalement par les marines militaires, qui recherchent surtout la légèreté des appareils, avec des pressions

très élevées, atteignant 20 kg par cm². La chaudière Belleville notamment a été appropriée à cet emploi.

111. Chaudières à tubes d'eau : tubes cintrés. — Des tubes de petit diamètre (25 mm à l'intérieur dans certaines chau-

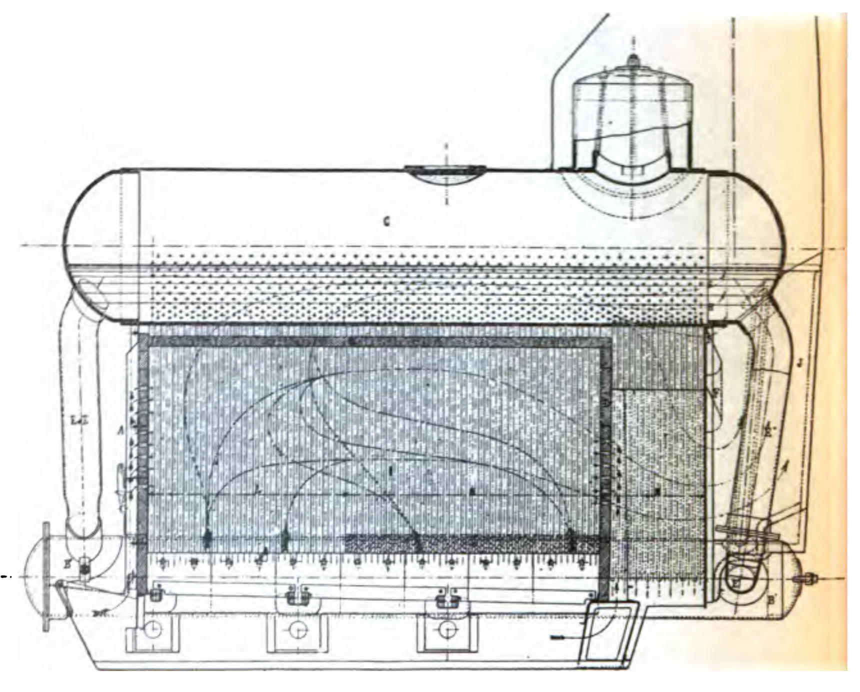


Fig. 233. — Chaudière Normand; coupe longitudinale.

dières) se cintrent facilement, et le cintrage évite les coudes avec raccords spéciaux; ces tubes sont mandrinés dans des corps en tôle. Les marines militaires ont fait récemment d'importantes applications de ces *chaudières express*. La chaudière Normand (fig. 233 et 234) est formée d'un corps cylindrique supérieur et de deux corps inférieurs réunis par une série de tubes minces et par de gros tuyaux exté-

rieurs de retour. En cintrant convenablement les tubes des rangées extrêmes, on les amène au contact, de manière à former des cloisons autour du faisceau, sur la face extérieure et du côté de la grille. Ces cloisons et des murs en briques

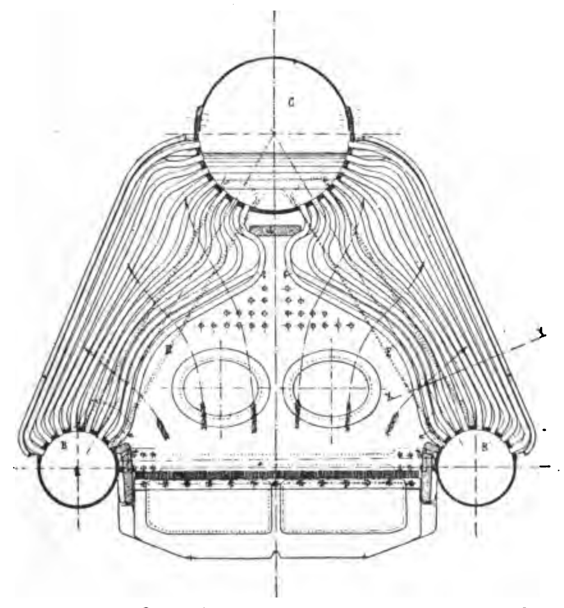


Fig. 234. — Chaudière Normand; coupe transversale.

Surface de grille	3,60 m²	Poids de l'appareil, avec toute la robinetterie, les accessoires, tels que : cendriers, boîte à fumée, briques, etc., sans eau	10,63 t
— de chauffe	171 m²	Poids total avec eau	13,32 t
Nombre de tubes d'eau. . . .	1.284		
Diamètre extérieur des tubes.	30 mm		
— intérieur des tubes.	25 mm		
Pression effective . . .	14 kg par cm²		

ramènent les gaz chauds du côté des portes de chargement en les faisant circuler autour des tubes. Les derniers types de chaudières Dutemple présentent des dispositions analogues.

Les tubes vaporisateurs de la chaudière Thornycroft (fig. 235) débouchent au-dessus du plan d'eau du collecteur supérieur, ce qui n'empêche pas la circulation. Le tube de retour est indispensable pour que l'eau

puisse accéder à ces tubes, tandis que, dans certaines

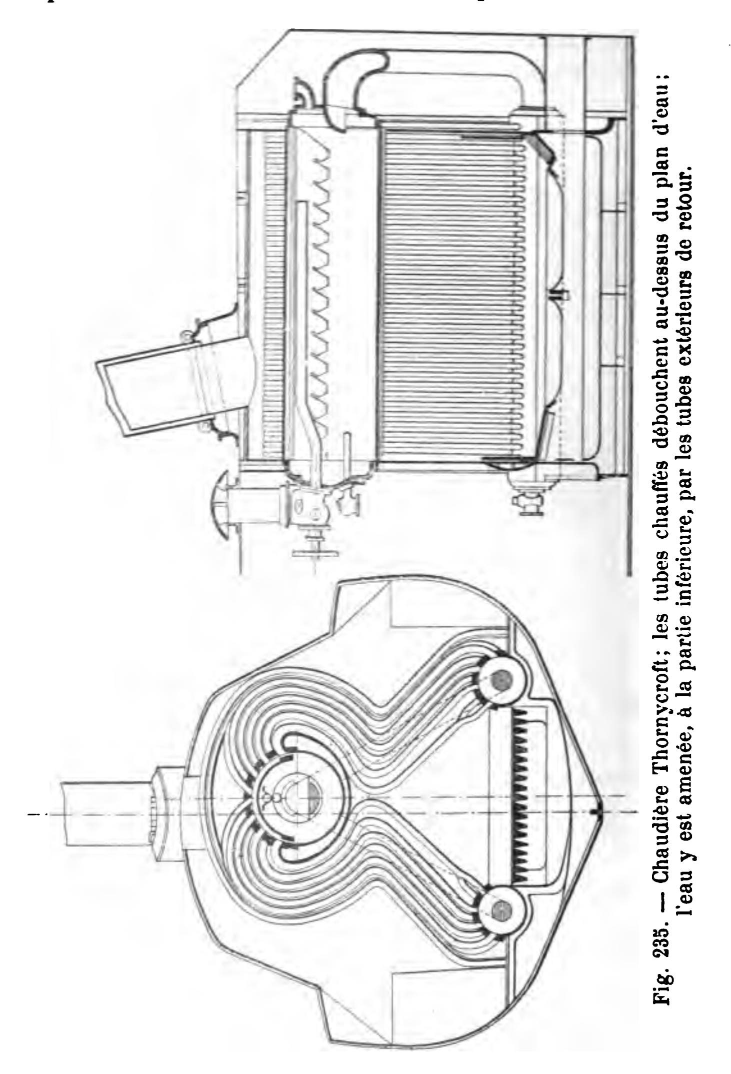


Fig. 235. — Chaudière Thornycroft; les tubes chauffés débouchent au-dessus du plan d'eau; l'eau y est amenée, à la partie inférieure, par les tubes extérieurs de retour.

autres chaudières, il a pu être supprimé, le retour d'eau

se faisant par la portion du faisceau la moins chauffée.

Certains générateurs fixes ont des dispositions analogues,

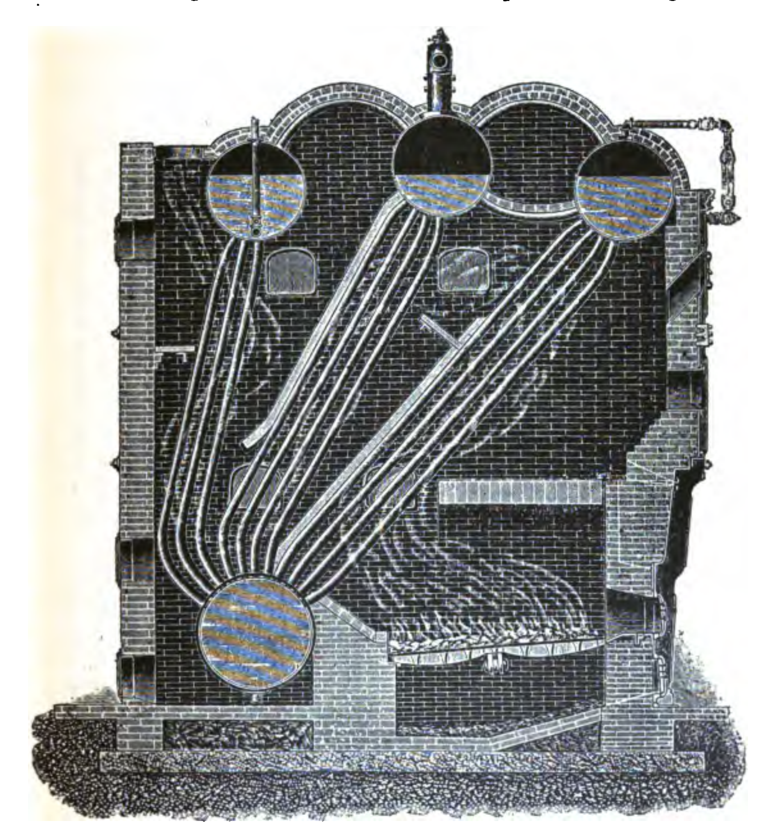


Fig. 236. — Chaudière Stirling.

par exemple celui de Stirling (fig. 236); mais les tubes ont un plus gros diamètre, 82 mm.

La plus petite section de tube se trouve dans le curieux générateur Serpollet (fig. 237) dont la capacité est extrêmement faible, l'eau circulant dans une fente étroite au milieu

d'un gros tuyau chauffé. Une pompe alimentaire y refoule l'eau, qui se vaporise immédiatement; un excès de pression assez considérable est nécessaire pour ce refoulement. La vapeur est surchauffée à la sortie du tube. Cette chaudière est employée pour des voi-

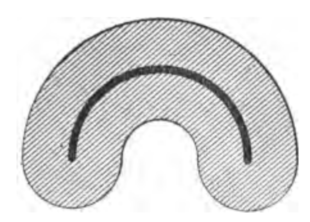


Fig. 237. — Coupe d'un tube Serpollet; échelle de 1/2.

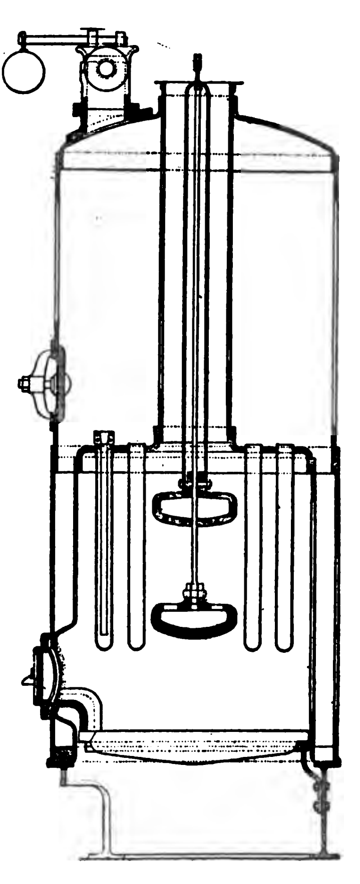


Fig. 238. — Chaudière Field.

tures automotrices, sur routes ordinaires et sur rails.

112. Chaudières à tubes concentriques. — Le tube *Field* (fig. 239), fermé à une extrémité, ne présente qu'un seul assemblage, conique, avec la plaque qui le porte : cet assemblage est simple, et la pression de la vapeur le resserre. Un petit tube intérieur, ouvert aux deux bouts, est destiné à amener l'eau qui remplace la vapeur formée. L'accès de l'eau par le tube central peut être gêné par le dégagement de la vapeur : on l'a modifié pour séparer les courants (fig. 239).

La chaudière *Field* (fig. 238) est cylindrique et verticale, avec un foyer intérieur : les tubes pendent verticalement au-dessous du ciel de foyer. Les gaz s'échappent par une cheminée centrale. Malgré l'obturateur suspendu au centre pour diriger les gaz autour des tubes, ils sont souvent encore très chauds dans la cheminée, qui se trouve portée à une température trop élevée dans la partie qui traverse la vapeur.

Le générateur Niclausse (fig. 240), employé à terre et sur mer, a des tubes concentriques presque horizontaux, qui débouchent dans deux lames d'eau verticales, séparées par une cloison, de manière à diviser les courants ; ces deux lames aboutissent au collecteur placé à la partie supérieure.

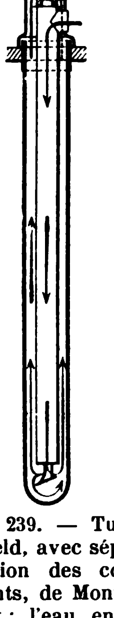


Fig. 239. — Tube Field, avec séparation des courants, de Montupet ; l'eau entre dans le tube central par une ouverture latérale ; la petite plaque placée à la partie inférieure est destinée à empêcher l'entrée de vapeur dans le tube central.

113. Réchauffeurs. — La température de l'eau d'alimentation des chaudières est généralement de 30 à 40°, si elle est prise dans un condenseur, et de 5 à 20°, quand elle vient de l'extérieur. Elle doit être chauffée, puis vaporisée. En la faisant circuler dans un *réchauffeur*, c'est-à-dire dans une sorte de chaudière supplémentaire placée dans le courant des gaz encore chauds qui se rendent à la cheminée, on commence l'échauffement de l'eau aux dépens de chaleur autrement perdue. Mais si la chaudière proprement dite a une grande surface de chauffe, les gaz qui la quittent sont déjà assez fortement refroidis, de sorte que le réchauffeur, dont l'installation est coûteuse, tout en produisant un cer-

tain effet utile, n'est pas très efficace. Quand on fait les frais de l'installation du réchauffeur, on peut en profiter pour diminuer la surface de la chaudière proprement dite.

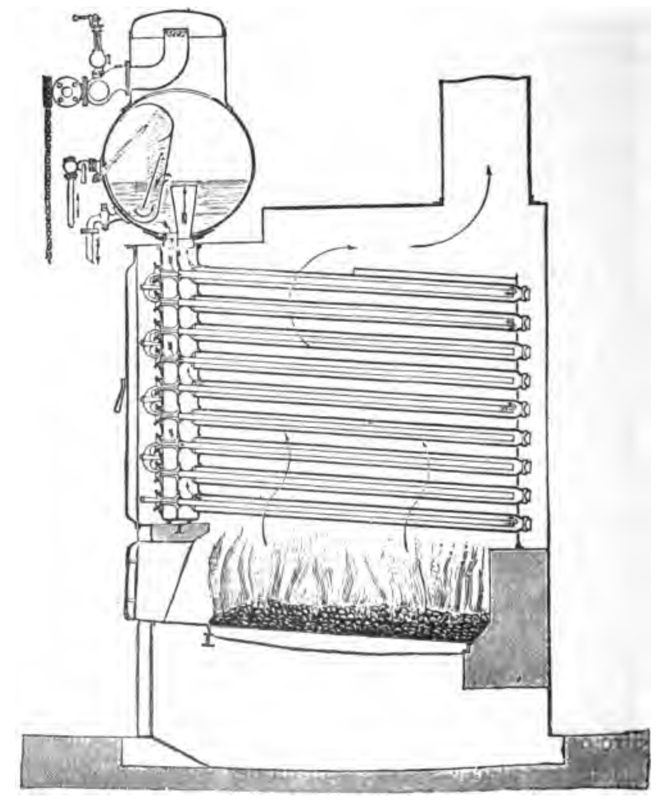


Fig. 240. — Générateur Niclausse; coupe longitudinale (d'après le croquis du constructeur, montrant les dispositions prévues pour l'arrivée de l'eau dans chaque tube et le dégagement de la vapeur).

Certains types de chaudières comportent des bouilleurs qui constituent de véritables réchauffeurs, et réalisent la *circulation méthodique* de l'eau, en sens inverse du courant des gaz chauds.

L'installation la plus logique, pour la bonne utilisation de la chaleur, comprendrait successivement, à partir du foyer, une chaudière proprement dite ou vaporisateur, avec une surface de chauffe relativement restreinte; un surchauffeur, s'il y a lieu; un réchauffeur d'eau; enfin un réchauffeur de l'air servant à la combustion. Les gaz rejetés seraient alors trop froids pour le tirage naturel, et on devrait employer un ventilateur.

Les réchauffeurs sont habituellement formés de tubes d'eau; ces tubes sont parfois en fonte (*économiseur Green*).

Pendant la marche normale, il ne doit pas se former de vapeur dans un réchauffeur; mais cette formation est toujours possible, quand la consommation des machines s'arrête ou se ralentit. Pour éviter les accidents, le réchauffeur doit être muni de soupapes de sûreté, à moins qu'aucune fermeture ne permette de l'isoler de la chaudière; même sans production de vapeur, la dilatation de l'eau suffirait pour causer la rupture d'un récipient clos hermétiquement.

Ordinairement le réchauffeur peut être mis hors circuit par un jeu de registres, pour le cas de réparation.

Avec les machines à échappement dans l'atmosphère, on échauffe facilement l'eau jusqu'à une température voisine de 100°, à l'aide d'une partie de la vapeur d'échappement. On la condense directement dans l'eau à chauffer, ou mieux, pour éviter l'entrée dans la chaudière des matières grasses, dans un faisceau tubulaire, analogue à un condenseur à surface. L'injecteur à vapeur d'échappement (§ 69) chauffe l'eau par condensation directe.

Lorsqu'on ne juge pas opportune l'installation d'un réchauffeur, au lieu d'envoyer directement dans la chaudière l'eau relativement froide, on peut la chauffer au préalable aux dépens de vapeur prise à la chaudière. Au point de vue du nombre de calories dépensées, il n'y a pas de différence dans les deux modes de procéder : c'est toujours l'eau chaude ou la vapeur de la chaudière qui échauffent l'eau. Mais le chauffage préalable est avantageux, en

évitant aux tôles de la chaudière le contact momentané de l'eau froide, qui produit des contractions nuisibles; il semblerait même que, dans certains cas, il augmente la production de la chaudière, sans que la raison en soit bien apparente. L'emploi de l'injecteur produit de même un chauffage préalable de l'eau à l'aide de la vapeur.

Les chaudières marines doivent être alimentées à l'eau douce, d'où nécessité, quand on a épuisé la réserve d'eau douce du bord, de distiller l'eau de mer pour réparer les fuites, toujours plus importantes qu'on ne le supposerait. Dans l'*évaporateur Weir,* l'eau de mer à distiller est chauffée par un faisceau tubulaire qui reçoit de la vapeur prise au premier réservoir intermédiaire de la machine (à triple expansion). L'eau qui provient de la condensation de cette vapeur retourne à l'alimentation. La vapeur que donne l'eau de mer est envoyée au second réservoir intermédiaire de la machine, et entre ainsi dans le circuit général. Quand l'eau soumise à la distillation devient trop riche en sels, on la rejette au dehors. Cette combinaison produit une vaporisation économique : on arrive à ne pas brûler plus de 35 kg de houille pour obtenir un mètre cube d'eau douce.

114. Surchauffeurs. — Les surchauffeurs consistent en faisceaux de tubes dans lesquels circule la vapeur. Ils sont montés dans les carneaux des chaudières, et parfois au-dessus d'un foyer spécial, auprès de moteurs très éloignés des générateurs, ou quand l'installation en est faite après coup. Pour bien fonctionner, ils doivent être placés dans un courant de gaz encore suffisamment chauds, vers le milieu de leur parcours. En les mettant trop près du foyer, on risquerait de les avarier. Il convient qu'ils puissent être mis hors circuit en cas de fuite.

115. Essais de chaudières. — Seuls des essais permettent d'apprécier exactement la valeur d'un type de générateur, les meilleures conditions de marche, les soins apportés à

la conduite. Suivant le degré de précision qu'on désire obtenir, ces essais exigent des précautions plus ou moins grandes.

Pour un essai complet, il faut non seulement peser le combustible brûlé, mais en déterminer le pouvoir calorifique : on sait ainsi quel est le nombre des calories que dégagerait dans le foyer une combustion parfaite. Si on mesure d'autre part la quantité d'eau vaporisée, en relevant la température de l'eau d'alimentation, et la pression de la vapeur produite, on connait le nombre des calories utilisées. Si la vapeur n'est pas sèche, il faut savoir quelle proportion d'eau elle entraîne : avec certains types de générateurs, qui donnent de la vapeur très humide, on commettrait une erreur importante en la supposant sèche. Si la vapeur est surchauffée, on en mesure la température.

En rapprochant les deux quantités ainsi relevées, le nombre des calories disponibles et celui des calories utilisées, on connaîtra le rendement pratique de l'appareil ; mais il est intéressant de savoir ce que deviennent les calories non utilisées.

D'abord une partie du combustible peut échapper à la combustion : on retrouve dans les cendres de petits morceaux non consumés, et la cheminée reçoit des gaz combustibles, oxyde de carbone et hydrocarbures. Surtout avec le tirage forcé, le combustible solide peut aussi être entraîné dans la cheminée. Le nombre des calories produites se trouve ainsi réduit.

La chaleur perdue se trouve surtout dans les gaz chauds rejetés dans la cheminée ; en jaugeant le poids [1], et en relevant la composition et la température de ces gaz, on peut calculer le nombre des calories ainsi emportées. Il convient aussi de tenir compte de la chaleur employée pour vaporiser l'eau mélangée au combustible, parfois en notable pro-

[1] Le débit en poids se déduit du débit en volume, estimé d'après la vitesse des gaz.

portion. Enfin des calories, en nombre assez important, se

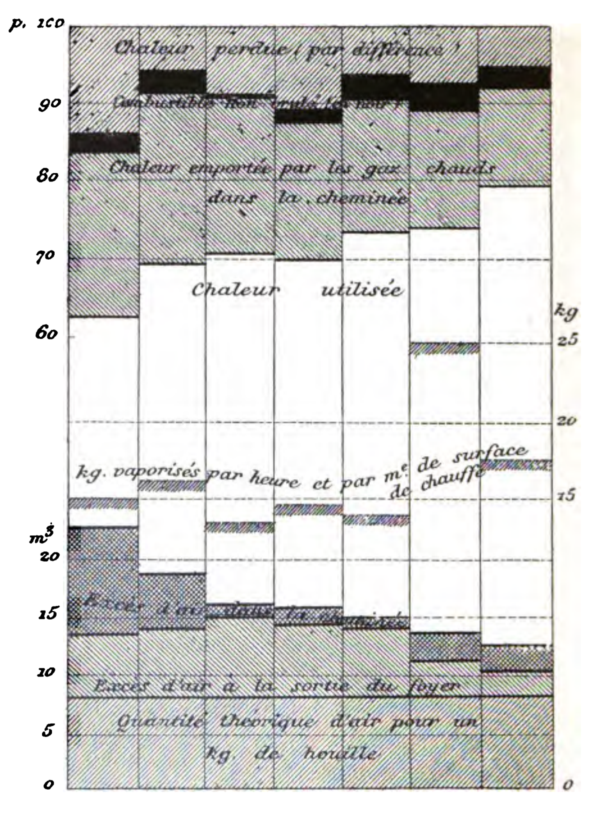


Fig. 241. — Représentation des résultats des essais de plusieurs chaudières, exécutés à l'exposition de Francfort en 1894. Le diagramme montre, pour sept essais, la division, en centièmes, du pouvoir calorifique du combustible en quatre parties : celle qui est utilisée (62 à 79 p. 100) ; celle qui est emportée dans la cheminée; celle qui correspond au combustible non brûlé ; enfin celle qui est perdue extérieurement. La partie inférieure du diagramme fait voir l'excès d'air mélangé aux gaz de la combustion à la sortie du foyer et dans la cheminée ; on voit que certaines chaudières donnent lieu à de fortes rentrées d'air. La vaporisation moyenne par mètre carré de surface de chauffe et par heure est aussi donnée.

dissipent par rayonnement et par conductibilité : la quantité de chaleur ainsi perdue est difficile à mesurer ; on la calcule généralement par différence.

Des représentations graphiques, comme celle de la figure 241, montrent clairement l'emploi de la chaleur disponible dans le combustible. On a représenté, sur cette figure, les excès d'air à la sortie du foyer, et dans la cheminée : on voit qu'il se produit dans le trajet des rentrées d'air importantes.

La chaudière doit se retrouver à la fin de l'essai dans le même état qu'au commencement, c'est-à-dire avec la même quantité d'eau, la même pression, le même poids de combustible sur la grille, au même état d'ignition. L'appréciation du poids et de l'état du combustible risque d'être peu précise : il convient donc que la durée de l'essai soit longue pour que les erreurs d'estimation n'aient pas une trop grande influence.

En donnant les résultats des essais de chaudières, on indique le plus souvent le poids vaporisé par un kilogramme de combustible ; parfois on indique un poids fictif, en supposant que l'eau est prise à 0° et vaporisée à 100° ou bien prise à 100° et vaporisée sous cette même température : on calcule ces poids fictifs en admettant que le nombre de calories reçues par l'eau reste le même que dans l'opération effectivement faite. Il importe de ne jamais omettre la mention exacte de la manière de compter qu'on adopte.

116. Comparaison des générateurs. — Des chaudières de types différents peuvent être considérées comme presque équivalentes, si elles sont bien proportionnées, et il est assez rare de trouver des formes qu'on puisse déclarer en principe nettement supérieures. La production d'un générateur dépend avant tout de l'appareil de combustion, caractérisé, avec les dispositions usuelles, par l'étendue de la grille, pourvu que le régime de la combustion soit connu. Le foyer doit être disposé pour que la combustion soit com-

plète et se fasse à température élevée sans être excessive.

Une fois la chaleur produite, elle doit être recueillie sur une surface de chauffe suffisante; toute la surface de chauffe n'est d'ailleurs complètement utilisée que si le courant gazeux la parcourt effectivement ; il importe aussi d'éviter la rentrée de l'air froid, qui absorbe inutilement la chaleur.

A l'intérieur même de la chaudière, il convient que la vapeur se dégage facilement, et soit immédiatement remplacée par l'eau : sous ce rapport, certains générateurs laissent à désirer. Une circulation rapide de l'eau est avantageuse.

Les volumes d'eau et de vapeur, pour une même surface de chauffe, varient beaucoup d'un type à l'autre : un grand volume d'eau rend la production régulière, et la conduite facile; un faible volume permet une mise en pression rapide.

L'emplacement occupé et le poids du générateur sont des éléments qui ont parfois une grande importance. Les prix varient souvent d'un type à l'autre pour des appareils équivalents.

117. Alimentation. — Alimenter une chaudière, c'est remplacer l'eau qui s'y vaporise. Dans certains cas, on emploie pour l'alimentation l'eau tiède rejetée par la pompe à air du condenseur, eau qu'on débarrasse difficilement de toute trace de matières grasses nuisibles dans les chaudières.

Pour pénétrer dans la chaudière, l'eau doit en surmonter la pression effective. Avec une pression effective de 10 kg par cm^2, le travail nécessaire élèverait l'eau à la hauteur de 100 m ; c'est une dépense de 100 kgm par kilogramme d'eau. Si la machine motrice desservie par cette chaudière dépense 10 kg de vapeur pour produire un cheval-heure ou 270.000 kgm, le travail utile correspondant de l'alimentation sera de 1000 kgm, c'est-à-dire 0,37 p. 100 du travail produit. En réalité, à cause des frottements de l'eau et des appareils, l'alimentation consomme un travail plus grand.

Elle est *continue* lorsque la vapeur qui sort de la chaudière est constamment remplacée par un poids d'eau égal, et *discontinue* lorsqu'elle se fait par intermittences. L'alimentation à peu près continue est nécessaire pour les générateurs qui ne contiennent qu'un très petit volume d'eau: en ce cas, elle peut être régularisée par un appareil automatique, comme dans le générateur Belleville. L'alimentation discontinue exige des appareils capables de donner par moments un débit supérieur à la dépense moyenne: il est d'ailleurs utile que la puissance des appareils d'alimentation soit, dans tous les cas, largement calculée.

L'alimentation des chaudières se fait au moyen de *pompes*, de *bouteilles alimentaires* ou d'*injecteurs*.

Une soupape de retenue (obligatoire en France) est utile au point où le tuyau d'alimentation pénètre dans la chaudière.

L'eau d'alimentation est le plus souvent envoyée au milieu de la masse d'eau contenue dans la chaudière; mais on peut aussi la faire pénétrer dans la vapeur, qui l'échauffe plus rapidement.

La commande directe d'une pompe alimentaire par un moteur est facile, lorsque la vitesse de rotation n'est pas grande. La pompe est à piston plongeur, avec soupapes métalliques. Pour des rotations rapides, comme celles des essieux de locomotives, le fonctionnement de la pompe devient difficile, et les chocs sur les soupapes sont parfois très forts; on les réduit en donnant aux soupapes une très faible levée: afin d'obtenir une section de passage suffisante, il faut alors en augmenter le diamètre et les multiplier.

La marche de la pompe devient encore plus difficile quand elle doit prendre de l'eau portée à une température élevée par la vapeur d'échappement : l'eau bouillante ne peut être aspirée, puisqu'elle dégage de la vapeur qui a la tension de l'atmosphère, et la pompe doit être montée en charge, de sorte que l'eau y coule par son poids.

La commande directe de la pompe alimentaire par le

moteur principal, outre la difficulté de fonctionnement aux grandes vitesses, ne permet pas l'alimentation pendant les arrêts, et la pompe marche inutilement quand la chaudière n'a pas besoin d'eau; dans ce cas, l'eau aspirée est renvoyée à la bâche, ou bien le conduit d'aspiration est fermé par un robinet. Ces motifs font préférer généralement, pour les grands appareils, la commande de la pompe par un moteur spécial ou *petit cheval*. La commande rectiligne, sans mouvement de rotation, est commode pour ces machines; mais souvent elles consomment beaucoup trop de vapeur. Si le travail de l'alimentation, frottements compris, exige 0,6 p. 100 du travail total produit, et si le petit cheval consomme par cheval-heure cinq fois plus de vapeur que le moteur principal, l'alimentation dépense 3 p. 100 de la vapeur produite; et on trouve souvent des consommations plus élevées. On évite cette perte en employant la vapeur, qui actionne le petit cheval, à échauffer l'eau d'alimentation.

La *bouteille alimentaire* est d'un emploi fréquent sur les générateurs qui servent au chauffage par la vapeur : c'est un récipient installé au-dessus de la chaudière : à l'aide d'un jeu de robinets, on le remplit d'eau, puis on le met en communication avec la chaudière.

Le principe des *injecteurs* a été examiné au § 69.

118. Épuration des eaux; désincrustants. — L'eau qui alimente les chaudières est rarement pure; les diverses substances qu'elle renferme ont presque toutes une action nuisible : les unes corrodent les tôles, d'autres les couvrent de dépôts solides, quelques-unes forment des émulsions visqueuses.

L'air dissous dans l'eau peut attaquer lentement le fer; toutefois cette attaque ne paraît se produire, d'une manière appréciable en pratique, que si l'eau contient aussi de l'acide carbonique (voir § 124).

On a quelquefois supposé que l'eau privée d'air pouvait se surchauffer dans les chaudières, puis donner lieu subite-

ment à une vaporisation abondante, ainsi qu'on le constate dans certaines expériences de laboratoire. Mais aucun fait n'est venu justifier cette supposition.

Les eaux extraites de certaines mines et celles de quelques sources naturelles contiennent de l'acide chlorhydrique ou sulfurique; si on doit les employer à l'alimentation des chaudières, il convient d'en neutraliser l'acide au préalable par l'addition d'une base telle que la chaux ou la soude.

Les matières grasses d'origine animale ou végétale se décomposent à la chaleur des chaudières, et forment de l'acide oléique et d'autres acides, qui attaquent les tôles. Ces matières, ayant servi au graissage des cylindres, se retrouvent dans les condenseurs. L'emploi de l'huile minérale n'a pas le même inconvénient. Dans tous les cas, d'ailleurs, il convient de séparer autant que possible de l'eau d'alimentation les matières grasses, qui sont nuisibles même quand elles n'ont pas d'action corrosive.

Dans les chaudières alimentées avec l'eau provenant des condenseurs à surface, on réduit beaucoup la proportion de graisse entraînée en filtrant l'eau. On emploie souvent à cet effet, sur les navires, des filtres composés d'éponges. L'eau, versée à la partie supérieure du filtre, coule facilement à travers les éponges, dont les cellules retiennent les matières grasses.

On ajoute quelquefois à l'eau de la soude ou de la chaux, après la traversée du filtre, dans la bâche où puise la pompe alimentaire. On introduit même quelquefois la chaux directement dans les chaudières. Elle doit être en quantité suffisante pour que l'eau des chaudières, essayée au papier de tournesol, ait toujours une réaction basique.

A la température de l'eau des chaudières, le chlorure de magnésium, qui existe dans les eaux de la mer et de certaines sources, se décompose en magnésie et en acide chlorhydrique, qui attaque le fer.

Les dépôts solides dans les chaudières sont formés par

les matières que les eaux bourbeuses tiennent en suspension, et plus souvent par les sels de chaux dissous. Le bicarbonate de calcium, soluble dans l'eau froide, abandonne la moitié de l'acide carbonique dès que l'eau est chauffée, et donne un précipité de carbonate insoluble. L'eau froide peut dissoudre une certaine quantité de sulfate de calcium, qu'elle abandonne en partie quand elle est chauffée.

Souvent on essaye rapidement les eaux au moyen d'une dissolution titrée de savon dans l'alcool, qui ne produit de mousse que lorsque les sels dissous ont été neutralisés par le savon. On mesure ainsi le *degré hydrotimétrique* de l'eau. Pour chaque degré hydrotimétrique, un litre d'eau peut contenir :

Soit 0,0057 g de chaux;
Soit 0,0114 de chlorure de calcium;
Soit 0,0103 de carbonate de calcium;
Soit 0,0140 de sulfate de calcium;
Soit 0,0090 de chlorure de magnésium;
Soit 0,0120 de chlorure de sodium.

Les eaux très pures, que donnent certaines sources de terrains granitiques, ont un titre hydrotimétrique inférieur à 10° et même à 5°. Dans beaucoup de sources et de rivières, on trouve des titres de 10° à 20°; le titre des eaux très chargées est compris entre 20° et 30° et dépasse même 30°.

La nature physique des dépôts a une grande importance : bourbeux ou pulvérulents, il sont facilement extraits des chaudières; mais souvent ils forment des croûtes dures et cristallines, qui adhèrent aux tôles. Il est nécessaire de débarrasser de temps en temps les chaudières de ces dépôts, en les lavant avec des jets d'eau et en raclant les parties entartrées.

Les matières grasses, qui sont amenées dans les chaudières par l'eau de condensation, forment à la surface du liquide des écumes qui s'émulsionnent avec la vapeur : cette émulsion donne lieu à des entraînements d'eau. Le même effet peut se produire avec certaines matières vis-

queuses, qui sont quelquefois refoulées accidentellement dans les chaudières des sucreries, des féculeries, et avec les dissolutions de sel marin, qui se concentrent par l'évaporation.

Les matières grasses peuvent aussi former sur les tôles des enduits qui ralentissent la transmission de la chaleur : la température du métal risque alors de s'élever beaucoup trop.

Le moyen le plus sûr d'éviter ou du moins de beaucoup réduire les dépôts dans les chaudières consiste à purifier au préalable l'eau d'alimentation par décantation ou filtrage, si elle tient des matières solides en suspension, et par précipitation des sels dissous.

Parmi les nombreux procédés d'épuration chimique des eaux, les plus simples et les plus employés pour l'eau des chaudières consistent en additions de chaux et de soude : la chaux précipite le bicarbonate de calcium, en le transformant en carbonate simple; avec le sulfate de calcium, le carbonate de sodium donne du carbonate de calcium insoluble et du sulfate de sodium qui reste dissous.

La chaux ajoutée est dissoute dans l'eau, dont la quantité doit être assez grande, ou bien elle est en suspension, formant un *lait de chaux*.

Le précipité de chaux doit être séparé par décantation ou par filtrage. La formation du précipité est souvent assez longue : certaines eaux, chargées de matières organiques, demeurent troubles très longtemps.

Plusieurs appareils ont été construits pour l'épuration continue des eaux des générateurs : les réactifs (chaux et carbonate de sodium) sont ajoutés à l'eau en proportions convenables; des chicanes sont disposées pour recueillir les dépôts.

Le chauffage préalable de l'eau par la vapeur d'échappement des machines dépourvues de condenseur, joint à l'action des réactifs, permet une séparation des sels dissous.

Lorsque l'eau n'est pas épurée au préalable, on cherche

souvent à éviter les dépôts en croûtes dures à l'aide de désincrustants. Ces désincrustants ont des compositions diverses; souvent ils contiennent des substances inertes, ou même nuisibles; leur action est d'ailleurs très variable selon la nature des eaux.

Des matières organiques, telles que les pommes de terre, l'amidon, la fécule, le tannin et divers bois de teinture, rendent les dépôts pulvérulents, et, par suite, d'une extraction facile. Ces matières ont parfois le défaut de faire mousser l'eau et de donner lieu à des entraînements avec la vapeur.

Dans les chaudières entartrées, les désincrustants font parfois détacher les croûtes formées par les dépôts : avec certaines formes de chaudières, il est alors à craindre que l'accumulation de ces croûtes sur les tôles chauffées ne les expose à des coups de feu.

Le carbonate de sodium, qui décompose le sulfate de calcium, est la base de nombreux désincrustants.

Le zinc est employé surtout pour éviter l'attaque du fer : c'est la plaque de zinc, plus attaquable que le fer, qui se combine à l'oxygène. Les dépôts adhèrent moins aux tôles qui restent lisses.

Avec les sels très solubles, tels que le chlorure de sodium, on empêche la concentration indéfinie du liquide par l'*extraction* d'une fraction de l'eau introduite, extraction autrefois employée pour les chaudières marines alimentées à l'eau de mer; par exemple, en extrayant constamment le cinquième de l'eau d'alimentation, la proportion de sel ne dépasse pas cinq fois la proportion initiale. La chaleur de l'eau extraite, et rejetée à la mer, peut n'être pas perdue entièrement, si on l'utilise pour un chauffage méthodique de l'eau d'alimentation, formant un courant inverse.

117. Indicateurs de niveau. — Il est nécessaire de connaître à tout instant le niveau de l'eau dans les chaudières. Les règlements français prescrivent, à cet effet, deux indi-

cateurs distincts, dont l'un doit être un tube transparent. Ce tube, en verre ou en cristal, est tenu par deux tubulures en bronze fixées sur la chaudière (fig. 243). Deux robinets permettent de fermer les communications avec la chaudière; un troisième robinet sert à la *purge* du tube et des communications. L'appareil est disposé pour qu'on puisse remplacer, pendant la marche, un tube brisé, et nettoyer les conduits des tubulures, quand la chaudière est hors feu. Il est bon que les robinets d'isolement soient manœuvrés à l'aide d'une tige assez longue pour être tournée sans danger, lorsqu'un tube vient à se rompre.

Le tube en verre donne une indication commode, mais quelquefois trompeuse. Il importe que les communications avec la chaudière soient courtes et directes, et que rien ne vienne les obstruer.

La figure 242 montre, comment une garniture élastique, mal disposée, peut venir boucher le tube. Un montage convenable (fig. 243) supprime ce danger d'obstruction.

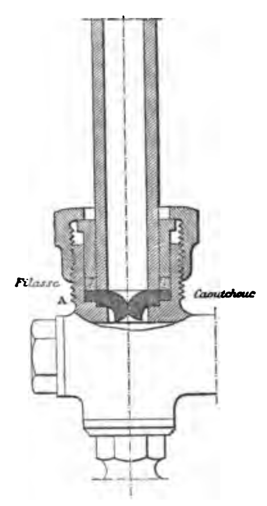


Fig. 242. — Tube en verre bouché par la matière plastique de sa garniture.

Des tuyaux de communication longs et courbés, comme sur la figure 244, faussent l'indication du tube de niveau. L'eau qui remplit les tuyaux est moins chaude que dans la chaudière : cette action tend à abaisser le niveau apparent dans le tube au-dessous de la surface de l'eau dans la chaudière : mais la dépression qui résulte de la condensation de la vapeur et les résistances au mouvement de l'eau condensée, qui redescend à la chaudière, relèvent le niveau, comme le montre la figure. Il suffit, du reste, d'étrangler le passage supérieur, en manœuvrant le ro-

binet, pour élever le niveau dans le tube de verre

On doit vérifier l'état de l'appareil par des purges fréquentes : une vérification complète exige la fermeture

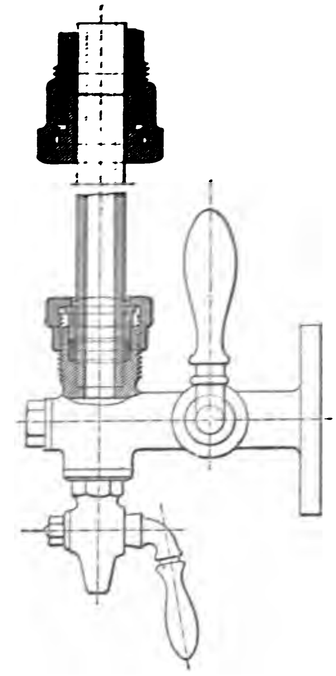


Fig. 243. — Montage des garnitures de tubes de niveau évitant l'obstruction ; la matière plastique est logée dans une gorge à quelque distance de l'extrémité du tube ; un presse garniture, serré par un écrou, la comprime. La figure montre le robinet de communication inférieur avec la chaudière, le robinet de purge, et, à gauche, la tête de la vis qui bouche une ouverture placée dans le prolongement de la communication avec la chaudière pour le nettoyage. La monture supérieure en bronze n'est représentée que partiellement.

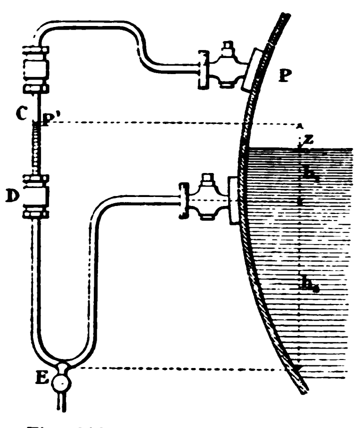


Fig. 244. — Indication erronée des tubes de niveau à longues communications.

successive de chacune des deux communications avec la chaudière, pendant la purge.

Divers systèmes de fermeture automatique arrêtent les jets d'eau chaude et de vapeur qui se produisent quand le tube se brise. Avec ces appareils, les fermetures intempestives sont toujours à craindre, surtout au moment des purges. Ils peuvent être utiles lorsque la fuite d'eau et de vapeur, en cas de

rupture du tube, se produit dans une chambre close où elle serait dangereuse.

On se protège aussi contre le danger des ruptures par des enveloppes formées de grillages ou de glaces épaisses.

L'ouverture d'un robinet de jauge donne un jet d'eau ou de vapeur, qui permet de vérifier si le niveau est à peu près à la hauteur convenable. Il y a deux ou trois robinets étagés.

Les *flotteurs* transmettent, hors de la chaudière, l'indication du niveau, au moyen d'une tige traversant une garniture, généralement trop ou trop peu serrée, ou mieux par l'action attractive d'un aimant sur une aiguille d'acier à travers un tube en bronze, ou bien en tordant ou en faisant fléchir un tube de métal élastique.

Les flotteurs peuvent aisément commander des sifflets ou des sonneries, quand le niveau descend trop bas ou s'élève trop haut.

Pendant la marche d'une chaudière, le niveau de l'eau est relevé par les bulles de vapeur qui se forment constamment au sein de la masse liquide, et même, avec certains types de générateurs, par les poches de vapeur qui subsistent par places. Lorsqu'on ferme la prise de vapeur, la vaporisation cesse et le niveau s'abaisse aussitôt. Cet effet s'observe aisément sur les chaudières de locomotives.

120. Soupapes de sûreté. — Une soupape de sûreté doit se soulever dès que la pression de la vapeur atteint une limite déterminée. Une fois soulevée, elle devrait laisser échapper toute la vapeur produite, quelle que soit l'activité du feu. Devant la difficulté de réaliser ce programme, le décret du 30 avril 1880, relatif aux appareils à vapeur en France, ajoute « en étant soulevée ou déchargée au besoin ». Mais, pour cet usage, un appareil automatique est préférable à celui qui exige une manœuvre; ce qu'il est possible de réaliser, c'est que la surpression, pendant le dégagement de la vapeur, ne dépasse pas une limite convenable.

Il convient en outre, pour l'économie et pour la bonne marche des machines, que la soupape se referme sans laisser la pression s'abaisser beaucoup au-dessous de la limite fixée par le timbre.

La soupape doit être simple; l'entretien doit en être facile et le fonctionnement certain. On attache encore une certaine importance à ce que les conducteurs des chaudières ne puissent aisément gêner ou paralyser le fonctionnement des soupapes.

Pour calculer la charge que doit porter une soupape, on multiplie la surface pressée par la vapeur, en cm^2, par la pression effective, en kg par cm^2. On obtient ainsi la charge en kilogrammes.

La soupape repose sur une portée étroite, dont le diamètre intérieur définit la surface circulaire pressée par la vapeur. Elle doit être en contact avec le siège sur toute l'étendue de la portée prévue, sinon la vapeur presserait une surface plus grande qu'on ne le suppose.

La surface de portée est plane ou conique. La première forme offre une plus large issue à la vapeur, pour une même levée, généralement très petite, de la soupape, car la largeur de la fente est égale à la levée même si la portée est plane, tandis qu'elle est moindre avec une portée conique.

Le contact de la soupape et du siège s'obtient en *rodant* les deux pièces l'une contre l'autre, avec interposition d'un peu d'huile et de poudre fine d'émeri.

La soupape est guidée verticalement par un téton central ou par des ailettes. Il est essentiel que ces guides ne donnent pas naissance à un frottement notable et surtout qu'ils ne puissent se coincer.

La soupape peut être chargée directement par une masse métallique.

Plus fréquemment, on fait usage d'un poids moindre, agissant à l'extrémité du grand bras d'un levier, dont le petit bras charge la soupape; le calcul du poids, en fonction des bras de levier, est des plus simples; dans ce cal-

cul, on peut tenir compte du poids du levier, qu'on suppose concentré au centre de gravité. La construction doit réaliser avec précision les bras de levier prévus dans le calcul ; l'articulation sur un tourillon laisse incertaine la position du point d'appui du levier : l'emploi des *couteaux* fait disparaître cette incertitude (fig. 245).

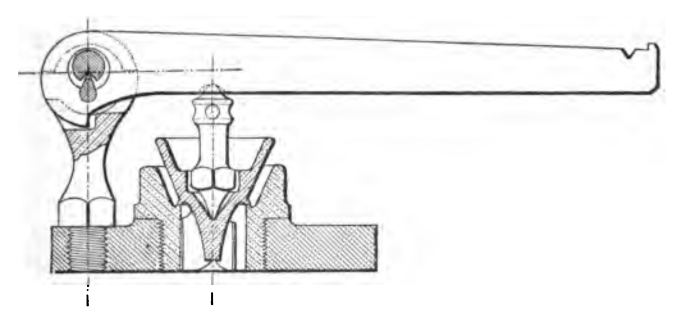


Fig. 245. — Soupape de sûreté Dulac, articulée sur couteau (le poids suspendu à l'extrémité du levier n'est pas représenté).

Sur les chaudières des locomotives, des bateaux, et en général sur toutes celles qui se déplacent, le mouvement fait danser les soupapes chargées par des poids, qui sont avantageusement remplacés par des ressorts, agissant directement, ou par l'intermédiaire d'un levier.

En France, comme dans beaucoup d'autres pays, chaque chaudière doit porter deux soupapes au moins. La dimension des appareils est établie empiriquement. Il n'est pas difficile de régler une soupape de manière qu'elle se lève avec précision, quand la pression de la vapeur atteint la limite supérieure, pourvu qu'elle soit bien construite et bien rodée ; mais dès que la soupape fonctionne, la force qui la soulève change. Elle est pressée par une nappe de vapeur en mouvement, et la pression dans les diverses sections de cette nappe ne reste plus la même. En somme, dès que la soupape s'ouvre, elle tend à se refermer, et la pression dans la chaudière peut s'élever au-dessus de la limite

supérieure, avant que la soupape débite toute la vapeur produite. On a observé des surpressions de plus de 2 kg par cm², avec les appareils tels qu'ils sont ordinairement établis; pour un même appareil, ces surpressions sont d'autant plus grandes que la pression de marche est plus élevée.

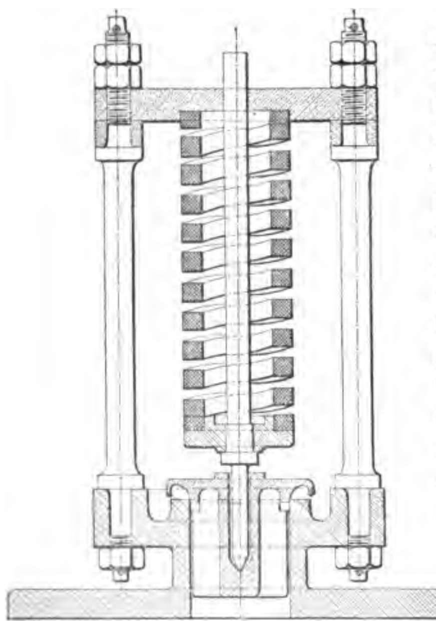


Fig. 246. — Soupape Adams à gorge et à charge directe, pour locomotives.

Avec un diamètre convenable, la soupape usuelle, malgré le défaut qui vient d'être signalé, suffit dans bien des cas; et il ne semble pas qu'en pratique ce défaut ait eu de conséquences fâcheuses. La soupape ordinaire peut toutefois devenir insuffisante si la vaporisation est extrêmement active, et s'il existe des raisons spéciales pour soustraire la chaudière à toute cause de fatigue anormale, si légère qu'elle soit.

On améliore le fonctionnement de ces appareils, en les disposant de telle sorte que la force qui les soulève augmente, ou au moins reste constante, lorsqu'ils laissent échapper la vapeur. Tel est le rôle de la gorge de la soupape *Adams* (fig. 246), du cône de la soupape *Dulac*.

Il est facile d'accroître ainsi la force qui soulève la soupape ; mais alors on risque d'en retarder la fermeture, qui ne se produit qu'après un abaissement excessif de la pression dans la chaudière : c'est le défaut de certains types à

grand débit ; et on ne l'évite que grâce à une construction très précise, conformément aux formes déterminées par tâtonnements, et grâce à un entretien très soigné.

La pression dans les chaudières est indiquée continuellement par le manomètre métallique décrit § 14.

121. Tuyauterie. — Les tuyaux de vapeur sont composés de tronçons terminés par des brides assemblées par boulons, sauf pour les très petits diamètres, dont la réunion se fait souvent par raccords filetés. Il est nécessaire de tenir compte des effets de dilatation, qui pourraient amener des ruptures, soit en ménageant des coudes de grand rayon, présentant une certaine flexibilité, soit en emmanchant l'extrémité du tuyau dans un presse-étoupes, qui en permet le glissement. Avec ce montage, il est indispensable que des dispositions efficaces s'opposent au déboîtement sous l'action de la pression intérieure.

On a souvent employé le cuivre, facile à travailler et peu altérable, pour les tuyaux de vapeur, mais la résistance du cuivre diminue beaucoup vers la température de 200°. L'acier est préférable au cuivre pour les tuyaux destinés à la vapeur sous forte pression ou surchauffée, qui atteint et dépasse cette température.

Le procédé usuel de brasure des brides aux extrémités des tuyaux ne présente pas toujours une solidité suffisante pour les fortes pressions. En outre l'opération mêmc, si elle n'est pas très habilement faite, risque de détériorer le métal du tuyau.

Les tuyaux de grande longueur sont exposés à des coups d'eau, qui se produisent au moment où on y laisse entrer la vapeur et qui sont assez violents pour provoquer des ruptures. Aussi est-il important de purger soigneusement les tuyaux, et de n'y faire pénétrer la vapeur que très lentement.

Outre le tuyau principal de prise de vapeur, les grandes installations de machines et de chaudières exigent beaucoup

d'autres tuyaux pour l'eau, la vapeur, le graissage. Les plans de tuyauterie des puissantes machines marines montrent une complication énorme.

122. Prises de vapeur. — La prise de vapeur, montée sur la chaudière, est le plus souvent fermée par une soupape. Lorsqu'elle atteint une grande dimension, une petite soupape supplémentaire, qui peut donner une admission préliminaire de vapeur (fig. 247), rend la manœuvre plus facile et évite la mise en pression trop brusque de la conduite.

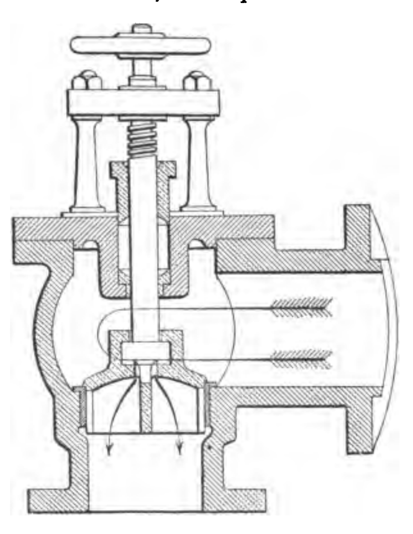


Fig. 247. — Soupape de prise de vapeur, avec petit clapet d'admission préliminaire; les flèches indiquent la vapeur sortant de la chaudière.

Une soupape automatique, se refermant quand le débit devient excessif, empêche la chaudière de se vider, si la conduite de vapeur vient à se rompre, ou bien en cas de déchirure d'une autre chaudière branchée sur la même conduite. Un décret du 29 juin 1886 rend ces appareils automatiques de retenue obligatoires en France, lorsque plusieurs générateurs (dépassant certaines dimensions) sont groupés.

L'installation de ces clapets présente parfois quelques inconvénients, parce que les fermetures intempestives, difficiles à éviter toujours, sont gênantes, et même dangereuses dans les machines d'extraction, dont le frein est commandé par la vapeur.

Les types de ces appareils sont assez variés : ce sont des soupapes, ou des clapets à charnière, ou une sphère mobile, dont l'entraînement se produit quand la vitesse du courant de vapeur dépasse la limite fixée : cet entraînement les applique sur leur siège. Il est utile que la fermeture ait lieu dans les deux sens, de manière à isoler une chaudière rompue aussi bien qu'une chaudière intacte.

Les *détendeurs* abaissent, jusqu'à une limite déterminée, la pression de la vapeur : un excès de pression est fréquemment prévu dans les générateurs à tubes d'eau. Le détendeur assèche légèrement la vapeur et fait disparaître les variations de pression qui se produisent dans le générateur.

Le détendeur consiste en une soupape ou en un appareil d'obturation analogue, que commande un piston, soumis d'un côté à la poussée d'un ressort, et, de l'autre côté, à la pression de la vapeur détendue. Lorsque cette pression s'élève, le piston manœuvre la soupape, de manière à réduire l'orifice de la prise de vapeur; lorsqu'elle diminue, au contraire, le ressort augmente cet orifice. La vapeur détendue n'a donc pas une tension rigoureusement constante : la variation correspond à celle de la poussée du ressort dans toute l'étendue de sa course, variation qui peut être minime.

On dispose ces appareils de manière qu'ils soient également chauffés de tous côtés par la vapeur, pour éviter les coincements dus aux dilatations inégales.

123. Isolants. — On doit revêtir soigneusement, avec des matières isolantes, l'extérieur des chaudières, des tuyaux de vapeur et des cylindres des machines, pour atténuer la déperdition de chaleur.

La quantité de chaleur, transmise à l'air par une paroi non enveloppée en contact avec la vapeur, varie avec la nature de la paroi : si la paroi est polie, cette quantité de chaleur est moindre que si elle est rugueuse. Le nombre de calories transmises, en une heure, par mètre carré, dans un air calme, varie de 6 à 12 pour chaque degré de différence des

températures de la vapeur à l'intérieur et de l'air extérieur. Avec un isolant qui recouvre le métal, on réduit cette perte à la moitié et même au tiers.

Les isolants employés sont très variés; on se sert de bois, de liège en bandes, de corde, de tresses en paille, de terre argileuse avec de la paille hachée, de scories filées, de briques en déchets de liège aggloméré, de bien d'autres substances peu conductrices. Outre ses qualités intrinsèques pour réduire la transmission de la chaleur, on demande à un isolant de se mettre en place facilement, de ne pas trop charger les tuyaux, de ne pas se désagréger à la chaleur, et de pouvoir se démonter et se remonter ; il faut encore que le prix n'en soit pas trop élevé. C'est d'après des résultats d'expériences qu'on apprécie la valeur isolante des diverses substances.

Dans certains cas, on se contente d'une enveloppe en tôle mince emprisonnant une couche d'air.

124. Accidents. — Les chaudières donnent lieu à des accidents plus ou moins graves, depuis l'explosion foudroyante, qui ruine les constructions voisines, jusqu'aux petites déchirures, toujours à craindre parce que les brûlures par l'eau chaude et la vapeur sont dangereuses. En général, l'explosion est d'autant plus redoutable que la masse d'eau chaude sous pression mise subitement en liberté est plus grande. Aussi la rupture d'un tube de chaudière produira peu d'effets destructeurs ; mais elle est dangereuse pour le personnel qui dessert l'appareil.

La gravité de ces ruptures de tubes peut être atténuée si les portes, qui enferment les faisceaux de tubes, sont solides et toujours bien fermées, de manière à ne pas s'ouvrir en cas d'avarie, sous la poussée de la vapeur, qui s'échappera en soulevant une *trappe d'expansion*, ménagée à la partie supérieure du massif. Il convient que les portes des foyers et des cendriers se ferment automatiquement du dedans vers le dehors.

Dans les salles closes, et surtout à bord des navires, la rupture des tuyaux de vapeur est extrêmement dangereuse : de telles ruptures ont causé d'épouvantables désastres [1].

Certains accidents prennent une effrayante gravité, lorsqu'ils se produisent au milieu d'ateliers remplis d'ouvriers. Plusieurs des catastrophes les plus graves sont dues à des chaudières de forges à flamme perdue. Le voisinage des habitations augmente aussi les conséquences désastreuses de certaines explosions.

Les locomobiles employées pour les travaux de l'agriculture donnent lieu à des accidents assez fréquents.

Un phénomène curieux est celui des explosions simultanées de générateurs d'une même batterie (27 sur 32, à Shamokin, Pennsylvanie, le 11 octobre 1894; 22 à Friedenshütte, Silésie, le 25 juillet 1887).

La rupture des chaudières tient au défaut de résistance de certaines parties, pour les efforts qu'elles supportent, soit que ces efforts deviennent excessifs par suite d'une augmentation anormale de pression ou par des effets de dilatation, soit que la résistance soit ou devienne trop faible. Un phénomène remarquable est l'extension des ruptures, qui intéressent quelquefois la chaudière entière ; il se produit sans doute dans le métal, surtout s'il est quelque peu fragile, des actions moléculaires qui propagent les cassures. Peut-être aussi, la masse d'eau, qui remplit la chaudière, transmet-elle des chocs violents, capables de briser les tôles au moment où se produit l'explosion.

La projection, à grandes distances, de fragments de la chaudière, s'explique, une fois la rupture produite, par la production subite d'une grande quantité de vapeur qui résulte de la chute brusque de pression [2]. Lorsqu'une chaudière s'ouvre à une extrémité, elle est parfois lancée tout

[1] Les précautions nécessaires pour éviter ces accidents ont été mentionnées au § 121.

[2] 1000 kg d'eau à 180° (pression absolue, 10,25 kg par cm²) brusquement soumis à la pression de l'atmosphère, donneront environ

entière à distance par la réaction de la vapeur qui s'échappe par l'ouverture.

Les accidents se rattachent à trois causes d'espèces différentes :

En premier lieu, l'appareil peut avoir des défauts originels : quelquefois les formes sont mal étudiées et les différentes parties ne sont pas proportionnées aux efforts qu'elles subissent en service; la qualité des tôles employées est défectueuse, ou bien le travail de chaudronnerie est mal exécuté.

En second lieu, si bien construite que soit une chaudière, elle est soumise à l'usure, comme tout autre appareil, plus même que d'autres appareils.

Enfin, on se sert maladroitement ou imprudemment des générateurs, en négligeant l'entretien courant, en élevant outre mesure la pression, en oubliant l'alimentation, en laissant s'accumuler les dépôts de tartre.

Lorsqu'un accident se produit, il arrive fréquemment qu'il est dû à l'action combinée de plusieurs causes. Ainsi l'usure est surtout à craindre sur une chaudière dont la résistance est à peine suffisante quand elle est neuve. Un léger excès de pression, qui serait sans danger sur une bonne chaudière, peut être funeste si elle est mal construite, ou affaiblie par l'usure. Il est souvent difficile d'attribuer à chaque cause sa juste part; suivant la tournure d'esprit de ceux qui jugent les responsabilités, une part prépondérante est donnée aux causes de telle ou telle espèce.

Le manque de résistance, par vice d'étude, est moins rare que ne seraient tentées de le croire les personnes étrangères à la construction. Il est difficile de calculer avec précision la fatigue des diverses pièces d'une chaudière, à moins que les formes n'en soient extrêmement simples; les dilatations inégales des différentes parties produisent des

850 kg d'eau à 100° et 150 kg de vapeur à la pression atmosphérique, occupant un volume de 250 m³.

poussées et des tiraillements, dont les effets sont loin d'être toujours négligeables. Lorsqu'une chaudière s'écarte des formes consacrées par une longue expérience, il faut l'examiner avec grande attention pour s'assurer qu'elle est solide, et encore on risque de laisser passer inaperçue quelque funeste erreur. Et même quand on reproduit des formes bien connues, de légères modifications, une simple augmentation de grandeur, une élévation du timbre, peuvent fatiguer jusqu'à un point dangereux certaines parties, qui étaient déjà un peu trop chargées, sans qu'on s'en doutât, dans les anciennes constructions.

La présence de chambres d'air et de vapeur, dans les parties chauffées, qu'on remarque parfois à la partie supérieure des bouilleurs, tient aussi à un vice d'étude ; la tôle est sujette à une altération rapide au-dessus de ces chambres.

Dans l'exécution des chaudières, on constate trop souvent de graves défauts : la qualité de bien des tôles employées pour les constructions est défectueuse. Quand on voit combien les tôles de certaines chaudières sont cassantes, on s'étonne qu'elles aient jamais pu résister en service.

Le forgeage des tôles est souvent une cause d'altération, malheureusement peu apparente, quand il est exécuté à une certaine température du métal (au *bleu*, vers 300°).

A l'emploi de mauvaises matières premières s'ajoute l'exécution défectueuse : tôles mal assemblées, trous de rivure ne se correspondant pas, et ramenés en regard par la funeste opération du brochage, rivets mal posés, cassures entre les trous de rivets.

Un défaut assez fréquent des tôles, et surtout des tôles fines, est la présence de *pailles* ou dédoublures, par suite du manque de soudure des mises qui la composent. Si elle se trouve fortement chauffée, la paille produit le soulèvement d'une bosse qui se détruit rapidement. Dès que la paille ou la bosse a quelque étendue, il faut remplacer la tôle ou du

moins y mettre une pièce, qui se trouve placée dans de mauvaises conditions, la rivure et la double épaisseur de métal étant à l'endroit le plus chauffé.

La seconde cause de danger se trouve dans l'usure des tôles, parfois très rapide; des corrosions locales se développent en peu d'années, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur des chaudières.

La corrosion intérieure est quelquefois due à l'emploi des eaux acides, qui proviennent de certaines mines; en outre, des chlorures, tels que le chlorure de magnésium, se décomposent à une température peu élevée, en formant de l'acide chlorhydrique. Mais la corrosion intérieure se produit aussi avec les eaux d'alimentation ordinaires, parfois même, d'une manière surprenante, avec des eaux très pures. Elle ne tient pas du reste uniquement à l'action de l'eau chaude, car elle se produit souvent pendant le chômage des générateurs : l'air humide attaque les tôles. Cette attaque se produit surtout quand il reste un peu d'eau dans les chaudières après la vidange, comme dans le fond d'une virole de grand diamètre, comprise entre deux autres plus petites. Lorsque le chômage d'un générateur doit se prolonger, il importe de l'assécher soigneusement, et de prendre quelques précautions pour le maintenir bien sec.

Parfois la corrosion débute par des piqûres isolées, ou *pustules*. Plusieurs piqûres voisines, par leur extension progressive, finissent par amincir la tôle sur une surface étendue.

Les tubes en fer et en acier sont le siège d'attaques analogues.

Il est vraisemblable que ces corrosions sont dues en partie à l'action de l'oxygène de l'air. Dans les chaudières en service, l'air est amené par l'eau d'alimentation qui le tient en dissolution.

C'est souvent dans le voisinage de l'arrivée d'eau d'alimentation que se produisent les corrosions; c'est dans cette région que l'air se dégage. Toutefois les eaux qui

paraissent surtout corrosives sont celles qui renferment, outre de l'air, de l'acide carbonique en dissolution.

Quand des pustules sont déjà formées, on peut en arrêter le développement en grattant les cavités qu'elles ont creusées dans le métal, afin d'y enlever toute trace de rouille, et en y appliquant plusieurs couches de goudron.

Les corrosions produisent aussi des sillons allongés, qui peuvent devenir fort dangereux, surtout le long des pinces, à l'endroit où une tôle cesse de porter contre la tôle contiguë, et dans les parties embouties. C'est ainsi que dans les chaudières de locomotives le bord arrondi des plaques tubulaires de boite à fumée, se corrode parfois en peu d'années. De même des sillons se creusent dans les arrondis concaves en contact avec l'eau.

Ces effets se produisent dans les parties où la tôle est soumise à des efforts répétés de flexion. Toutefois, dans les parties qui ne sont en contact qu'avec la vapeur, les tôles restent en général intactes. Quelques attaques isolées de ces parties, qu'on a constatées dans des chaudières marines, sont attribuées à des projections de chlorure de magnésium. Quelquefois des sillons se produisent en lignes horizontales à l'affleurement du niveau moyen de l'eau.

Les corrosions extérieures sont déterminées principalement par l'action des fuites de l'eau de la chaudière, action destructive dès qu'elle se prolonge. Elle s'exerce le long des pinces, autour des rivets et de tous les joints mal faits, autour des bouchons autoclaves fréquemment démontés. Ces corrosions ne doivent pas exister sur une chaudière bien construite et bien entretenue. Si la fuite se produit au contact de la maçonnerie, qui forme alors comme un emplâtre toujours humide sur la tôle, la corrosion s'étend sur toute la surface couverte (fig. 248).

Un autre genre de corrosion extérieure a été constatée dans les réchauffeurs, quand ils ne reçoivent que des gaz déjà fortement refroidis et quand ils sont placés dans des carneaux humides : la corrosion peut alors tenir à l'attaque

par l'acide sulfurique, qu'on trouve dans la suie qui recouvre ces réchauffeurs. Cet acide vient de l'oxydation du gaz sulfureux, produit de la combustion des pyrites (sulfure de fer),

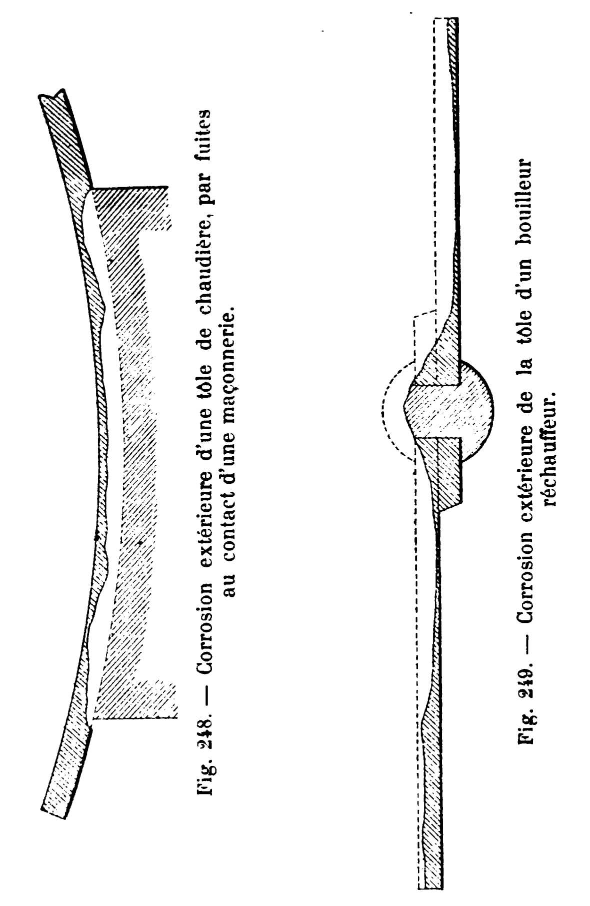


Fig. 248. — Corrosion extérieure d'une tôle de chaudière, par fuites au contact d'une maçonnerie.

Fig. 249. — Corrosion extérieure de la tôle d'un bouilleur réchauffeur.

que renferment souvent les houilles. Cette action ne se produit jamais lorsque les gaz quittent la chaudière à une température un peu élevée.

Les négligences dans l'entretien des générateurs ne sont

pas rares : on ne les débarrasse pas en temps utile, par des lavages, du tartre, qui s'accumule petit à petit, jusqu'à faire rougir les tôles directement chauffées ; les soupapes fonctionnent mal et restent collées sur leurs sièges ; les indicateurs de niveau, les manomètres, sont en mauvais état et donnent des indications inexactes. Ces négligences n'engagent pas seulement la responsabilité du chauffeur, mais ses chefs sont également coupables, quand elles sont habituelles.

Enfin le mauvais emploi des appareils peut causer un accident d'un moment à l'autre, par excès de pression ou par défaut d'alimentation. L'excès de pression est voulu ou non, suivant que les soupapes sont à dessein surchargées ou calées, ou bien mal entretenues et collées sur leurs sièges.

Les effets du manque d'eau et de l'alimentation intempestive sur des tôles trop chauffées ont été souvent exagérés ; il existe une sorte de légende à ce sujet, et bien des personnes sont encore portées à attribuer presque toutes les explosions à cette cause. Il est certain que les tôles perdent leur ténacité, quand elles arrivent au rouge : si l'on s'aperçoit qu'une chaudière est dans cet état dangereux, il faut jeter le feu et éviter toute cause d'augmentation de pression, même légère. C'est surtout dans les chaudières à foyer intérieur que le manque d'eau peut avoir des conséquences désastreuses, parce que les ciels de foyer, une fois découverts, arrivent vite au rouge. Lorsque les tôles sont très ductiles, la pression de la vapeur les emboutit quelquefois, en pareil cas, vers l'intérieur du foyer, sans les déchirer.

On a souvent supposé qu'en alimentant une chaudière dont les tôles avaient rougi par manque d'eau, on produisait une élévation considérable de pression, très dangereuse, par suite de la formation subite d'une grande quantité de vapeur. L'expérience, comme le raisonnement, démontre l'inanité de cette théorie.

125. Épreuves et surveillance. — Pour vérifier si les chaudières sont étanches et assez résistantes, on les soumet à une pression déterminée, en y refoulant de l'eau avec une pompe. Cette *épreuve à la presse hydraulique* est souvent obligatoire, notamment en France, en Allemagne, en Autriche, en Italie, en Russie, en Danemark, en Angleterre, pour la marine marchande. L'épreuve porte sur les chaudières neuves et doit être renouvelée au bout de certains délais : elle est, en outre, prescrite dans divers cas, tels que réparation, vente de l'appareil.

La pression d'épreuve dépasse généralement la pression la plus élevée en marche, suivant un principe général des essais de résistance, et aussi parce qu'en service les dilatations inégales augmentent la fatigue des tôles. Il convient toutefois que la surcharge d'épreuve ne soit pas assez forte pour détériorer l'appareil. En France, cette surcharge est au plus de 6 kg par cm^2 et de 4 seulement pour les récipients de vapeur ; pour les chaudières fonctionnant à une pression effective inférieure à 6 kg par cm^2, la surcharge est égale à cette pression, avec minimum de 0,5 kg. Pour les chaudières des bateaux fluviaux, d'après le décret du 9 avril 1883, la surcharge n'est que la moitié de la pression effective de marche, avec maximum de 3 kg par cm^2, lors des épreuves autres que la première.

L'essai à la presse est une bonne garantie de l'étanchéité des chaudières, plus difficile à obtenir à froid qu'à chaud. Au point de vue de la résistance, elle ne donne pas une sécurité complète, car on a vu des appareils dangereux la supporter avec succès. Aussi doit-elle être complétée par l'examen minutieux des tôles et des rivures, à l'extérieur et à l'intérieur.

La démolition des massifs de maçonnerie, nécessaire pour l'examen extérieur des tôles de certaines chaudières, rend parfois l'épreuve assez gênante ; mais indépendamment même de l'épreuve, la prudence commanderait de ne pas différer indéfiniment cet examen.

Pour éviter des projections dangereuses, en cas de rupture pendant l'essai, il convient que la chaudière soit entièrement remplie d'eau. Même avec cette précaution, il n'est pas sûr qu'un tampon en bois, bouchant un orifice, ne puisse être projeté ; il ne faut pas employer ce moyen simple de fermeture. La pression est mesurée à l'aide d'un manomètre étalon, monté sur la chaudière.

L'inspection périodique des chaudières, parfois exposées à des usures rapides en certaines parties, est la meilleure garantie contre les accidents. Cette inspection exige une expérience spéciale : peu de personnes peuvent l'acquérir aussi complètement que les agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

126. Conduite des chaudières. — Avant d'allumer le feu sous une chaudière, il ne faut jamais négliger de s'assurer qu'elle contient de l'eau jusqu'au niveau normal ; la présence d'eau dans le tube transparent n'est pas une garantie suffisante, tant qu'on n'a pas vérifié que ce tube communique librement avec la chaudière. L'allumage du feu sous la chaudière vide la détériore gravement en peu d'instants. On s'assure que les divers robinets sont dans la position convenable, celle de fermeture (sauf pour les communications du tube de niveau), et que les soupapes de sûreté peuvent jouer librement[1].

Avant l'allumage, toutes les parties qui s'obstruent rapidement, telles que cendriers, boîtes à fumée, tubes à fumée, ont dû être nettoyées.

Autant que possible, les feux ne doivent pas être poussés au début : une mise en pression lente est favorable à la conservation des chaudières.

Le combustible doit être chargé fréquemment et par petites quantités, de manière à entretenir sur la grille une

[1] On doit porter une attention spéciale aux robinets de vidange, qui peuvent rester ouverts sans que cette position dangereuse soit bien apparente.

couche d'épaisseur uniforme; il peut être bon de diminuer le tirage par la manœuvre du registre de la cheminée, pendant l'ouverture de la porte du foyer, afin d'éviter l'entrée d'air froid en excès, mais c'est une précaution assez assujettissante. Il ne faut pas la négliger toutefois quand l'ouverture des portes se prolonge, par exemple pour le *décrassage* de la grille, ou enlèvement des mâchefers qui la recouvrent.

La pression doit être maintenue régulière, en réglant sur les besoins les chargements de combustible, en manœuvrant le registre de la cheminée, et en ralentissant ou en forçant l'alimentation, quand le type de chaudière permet une variation du plan d'eau. Toutefois, l'alimentation régulière et continue est recommandable en général.

On purge de temps en temps, toutes les deux heures par exemple, le tube de niveau. Un tube de niveau brisé sera remplacé sans délai : il doit toujours exister, à la disposition des chauffeurs, des tubes de rechange, coupés à la longueur voulue. On soulèvera de temps en temps les soupapes de sûreté pour en vérifier le bon fonctionnement.

Lorsque le joint d'une pièce fixée contre une chaudière vient à perdre, il faut éviter de resserrer les écrous qui fixent cette pièce pendant que la chaudière est en pression, surtout quand la bride d'assemblage est en fonte. Il est arrivé plusieurs fois que ce serrage pendant la marche ait occasionné des ruptures désastreuses. Autant que possible on doit attendre la mise hors feu de la chaudière pour resserrer le joint.

Quand le chauffeur s'aperçoit que l'eau manque dans la chaudière (ce qui ne peut guère se produire quand les précautions qui viennent d'être rappelées ont été observées), s'il a constaté la présence de l'eau peu de temps auparavant, et s'il ne remarque rien d'anormal, il n'y a qu'à rétablir le niveau par une alimentation abondante. Le cas est plus embarrassant quand on ignore depuis quand le niveau d'eau a cessé d'être visible. On a bien la ressource extrême de jeter le feu, mais il serait en général aussi bon

de ralentir la combustion, en fermant le registre et en couvrant le feu, et d'alimenter, ce qui fait rapidement tomber la pression. On ne doit pas chercher en effet dans un cas pareil à maintenir sans arrêt la production de vapeur.

Pour l'arrêt d'une chaudière, si les feux doivent être maintenus allumés, on les couvre, on ferme le registre de la cheminée et les portes du cendrier, et le niveau de l'eau doit être élevé au maximum. On peut alors abandonner la chaudière, quand la pression s'est abaissée au-dessous de la normale, pourvu qu'on soit sûr du bon fonctionnement des soupapes de sûreté. Il est prudent de fermer les robinets du tube de niveau, pour éviter la vidange de la chaudière, s'il venait à se rompre; il ne faut pas oublier de les rouvrir à la reprise du service [1].

Quand la chaudière doit être mise hors feu, l'économie commande de laisser aussi peu de charbon que possible sur la grille au moment de l'arrêt.

Avant d'ouvrir la prise de vapeur sur la chaudière, on s'assure que les tuyaux dans lesquels on va envoyer la vapeur ne contiennent pas d'eau, et l'ouverture doit être très lente.

A certains intervalles, qui dépendent de la nature des eaux et de la quantité vaporisée, il faut arrêter la chaudière pour enlever les dépôts. Quelquefois la vidange se fait à chaud ; mais une vidange trop précipitée fatigue les tôles, qui risquent d'être trop chauffées, en l'absence de l'eau, par les maçonneries encore chaudes ; un lavage ultérieur à l'eau froide, avant refroidissement, est une cause d'altération des tôles et de dislocation des rivures. En outre, les dépôts mis à sec durcissent rapidement à la chaleur, et l'enlèvement en devient difficile : il faut *piquer* les tôles, travail pénible qui risque de détériorer le métal.

Quand on laisse la chaudière se refroidir complètement,

[1] Il serait bon de préparer une pancarte avec l'indication bien visible « Robinets fermés » qu'on placerait à côté du tube de niveau.

avant la vidange (ce qui peut exiger plus d'une semaine pour une chaudière entourée de maçonneries) on peut enlever les dépôts par le jet d'une lance ou par un simple grattage, à condition d'opérer immédiatement avant qu'ils ne sèchent. Au bout d'une demi-heure ou même d'un quart d'heure après la vidange, ils commencent à durcir et à adhérer aux tôles. On peut accélérer le refroidissement des chaudières en renouvelant deux ou trois fois l'eau de la chaudière (après un premier refroidissement pendant deux ou trois jours) : on laisse écouler l'eau tiède à mesure qu'on fait entrer l'eau froide. Ensuite, pour éviter le durcissement des dépôts pendant l'opération même du nettoyage, on fractionnera la vidange : par exemple, dans une chaudière à bouilleurs, on videra successivement le corps principal, puis chacun des bouilleurs[1].

[1] Ce procédé intéressant a été décrit par M. Schmidt, directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise.

CHAPITRE XII

EMPLOI DES MACHINES

127. Services demandés. — L'extrême variété des machines rend difficile le choix de celle qui convient pour chaque application. En faisant ce choix, on doit observer quelques règles générales, qui, du reste, s'appliquent à peu près de même pour toutes les constructions industrielles.

Chaque machine doit satisfaire à plusieurs conditions : la première est évidemment de pouvoir faire le service qu'on en attend. Aussi est-il important d'établir au préalable un programme aussi précis que possible de ce service.

On peut dresser une classification générale des diverses circonstances à prévoir dans le programme d'un moteur.

En premier lieu, la puissance nécessaire est ou constante ou variable. En parlant de puissance constante, on veut dire, en réalité, que les variations en sont minimes. Les variations importantes de la puissance peuvent être demandées dans des conditions très différentes, soit d'un instant à l'autre pendant la marche, soit, au contraire, pour des périodes plus ou moins prolongées en régime constant, soit seulement en vue d'augmentations ou de réductions futures. La variation demandée peut être comprise entre des limites assez peu éloignées (par exemple la puissance variera de 200 à 300 chevaux), ou bien être très étendue.

Quand la puissance demandée est très grande, un moteur unique prend des proportions gênantes : c'est principalement pour cette raison que certains bateaux ont jusqu'à trois hélices commandées chacune par une machine spéciale.

D'autre part, la nécessité d'appareils de rechange s'impose pour assurer la continuité absolue de certains services, par exemple dans les stations centrales électriques, pour les souffleries de hauts fourneaux. Lorsque la puissance demandée est très variable, la multiplicité des moteurs d'une station permet de les faire toujours fonctionner dans de bonnes conditions, en nombre variable.

En ce qui concerne la vitesse de marche, la plupart des machines comportent un arbre tournant; on fixe d'habitude la vitesse angulaire de cet arbre, ou simplement le nombre de tours par minute. Le nombre de tours restant à peu près constant, on demande une régularité plus ou moins grande de la vitesse augulaire; les variations doivent en être très faibles pendant chaque tour pour certaines applications, par exemple pour la commande des filatures, la production de la lumière électrique; certains usages admettent des irrégularités un peu plus grandes; enfin pour actionner les cylindres soufflants, par exemple, des variations assez fortes sont acceptables.

Pour certaines applications, au contraire, la vitesse peut varier entre des limites étendues : c'est ainsi que des pompes donnent par minute un nombre de coups variable suivant le débit nécessaire. Les machines de bateaux sont parfois conduites à des allures différentes. Les variations de vitesse sont fort grandes dans la locomotive.

La marche d'un moteur doit être tantôt continue, pendant une période parfois assez longue, tantôt coupée par des arrêts fréquents. Les dispositions de graissage sont prévues en conséquence.

Les conditions de démarrage sont différentes dans les diverses applications. Il est nécessaire qu'il se fasse rapidement, et sans hésitation, pour les machines d'extraction, les locomotives. Il en est de même pour les machines marines, les moteurs réversibles de laminoirs, mais alors le démarrage est assez facile, parce que la résistance est faible à ce moment. Ces conditions de démarrage ont été étudiées au §58.

Entrant dans des détails spéciaux, on tiendra compte des conditions d'emplacement de la machine, de la nature du personnel qui en aura la charge, des ressources locales pour la réparation.

Il ne faut pas omettre d'examiner les moyens de transport de la machine depuis les ateliers de construction jusqu'au lieu où elle sera montée, et des appareils de levage disponibles pour la mettre en place. Par exemple, certaines usines ne sont accessibles que par des chemins muletiers; les appareils qu'on y envoie doivent être composés de petites pièces facilement transportables. Les chemins de fer ne peuvent admettre les chargements dépassant leur gabarit.

Une considération de première importance est la sécurité des personnes qui se servent des machines et qui les approchent. Elle est assurée d'abord par les proportions des diverses parties, l'emploi de bonnes matières et le soin dans l'exécution. Mais il est en outre une foule de détails, qu'enseigne l'expérience, parfois insignifiants en apparence, qui font disparaître des risques d'accidents. C'est ainsi que des gardes-corps suffisants entoureront les volants et autres pièces tournantes; les engrenages seront recouverts d'enveloppes; les pièces mobiles ne devront pas s'approcher tellement des pièces fixes qu'elles puissent broyer une main ou un bras imprudemment avancé. Avec le bâti Corliss, il arrive souvent que la bielle, dans sa plus grande inclinaison, s'approche trop de l'extrémité des glissières.

Les dispositions de sécurité ont été l'objet d'études spéciales et de publications fort utiles.

En ce qui concerne les chaudières, il convient que les chambres de chauffe soient munies d'issues commodes, afin que les chauffeurs puissent s'échapper en cas d'accident. Ces issues doivent exister aux deux bouts de la chambre de chauffe, et, si elle est longue et dessert une batterie de générateurs, il faut aussi des sorties intermédiaires. Un tube crevé, une tôle fissurée, peut donner issue à un jet très dangereux d'eau chaude : il faut que la chambre puisse

être évacuée immédiatement et sans qu'on ait à passer sous le jet brûlant, ce qui aurait lieu avec une issue unique.

Le tableau, qui suit, résume les principales conditions de l'établissement des machines :

Puissance	**constante.**			
	variable	**subitement,** **par périodes,** **dans l'avenir,**	**variation**	**moyenne (rapport de 2 à 3).** **étendue.**
Vitesse	**peu variable**	**très régulière.** **moyennement régulière.** **peu régulière.**		
	variable	**avec variations de la puissance dans le même sens.** **avec puissance constante.** **avec variations de la puissance en sens inverse.**		
Marche	**continue.**			
	discontinue	**avec rares arrêts.** **par périodes de quelques heures.** **avec arrêts très fréquents.**		
Certitude de la marche	**Aucun arrêt ne doit se produire.**	**Appareil unique.**		
	Un court arrêt est tolérable.	**Appareil de rechange.**		
Démarrage	**Certain.** **Facile.**	**En charge.** **A vide.**		
	Peu important.			
Facilité de la conduite	**Conducteur habile.** **Conducteur peu exercé.**			
Réparations	**Ateliers de réparation, ouvriers exercés.** **Absence de ressources pour la réparation.**			
Transport	**Aucune limite au poids et au volume.** **Par chemin de fer.** **Par routes de terre.** **Par sentiers muletiers.** **A dos d'homme.**			
Sécurité.				

128. Prix de revient. — Lorsqu'une machine, appropriée aux diverses conditions spéciales de l'emploi qu'on en veut faire, peut rendre les services qu'on en attend, il reste à déterminer ce que coûtent ces services : seul le prix de la puissance, que fournit un moteur, permet d'en apprécier l'utilité réelle, et de le comparer à des appareils équivalents.

La considération des prix de revient montre encore si une

légère amélioration, commode, mais non indispensable, par exemple une régularité de vitesse un peu plus grande, n'est pas trop chèrement achetée.

Il est assez facile, avec un peu de soin, d'établir le compte d'une machine installée ; on en déduit le devis du prix de la puissance que fournira un moteur projeté ; ce devis est forcément approximatif, puisqu'il comprend des éléments variables comme le prix des combustibles.

La dépense des machines est souvent rapportée au cheval-heure, ou aux 270 000 kgm. Il convient que le travail dont on donne ainsi le prix soit le travail effectif produit par la machine. D'autres fois la dépense est comparée à la tâche utile accomplie par le moteur et par les appareils qu'il commande ; c'est ainsi que, pour une machine élévatoire, on étermine le prix du mètre cube d'eau élevée à une certaine hauteur ; pour une machine marine, on compte le prix du parcours effectué avec une vitesse déterminée ; pour une locomotive, le prix du kilomètre dans des conditions fixées. En pareil cas, il convient, autant que possible, d'isoler, dans la dépense totale, la part propre du moteur et celle des appareils qu'il commande.

Même quand on ne considère que le moteur seul, en établissant le prix des 270 000 kgm, ce prix subit l'influence de circonstances étrangères au moteur même, mais dont il faut tenir compte avec grand soin. Il ne reste pas le même pour un travail constant et pour un travail variable, pour une machine continue et pour un emploi intermittent. Les prix les plus bas s'obtiennent par une marche à peu près continue, avec une puissance uniforme.

Le fonctionnement d'un moteur entraîne des frais d'exploitation qui se renouvellent continuellement ou à de courts intervalles : telles sont les dépenses de combustible, d'huile, de matières diverses, nécessaires à l'entretien courant et aux petites réparations ; celle de main-d'œuvre, pour la conduite et l'entretien ; il y faut joindre quelques accessoires, impôts, assurances, surveillance. Quelques-unes de

ces dépenses subsistent même quand le moteur chôme ; il faut toujours payer l'entretien, les impôts.

D'autres dépenses, nécessaires pour obtenir les services d'un moteur, se font une seule fois, ou à de longs intervalles : ce sont celles qui résultent de l'installation première et des grandes réparations ou des modifications de l'appareil. Ces *dépenses d'établissement* sont faites par avance, et on en profite pendant une période assez longue, tandis que les *dépenses d'exploitation* se règlent à peu près au moment où elles sont utiles. C'est là surtout ce qui les distingue, car elles ne sont pas d'essences si différentes qu'on le croit souvent : elles se feraient dans les mêmes conditions si, par exemple, en montant une machine, on était obligé d'approvisionner le charbon qu'elle consommera pendant une longue suite d'années, ou si, inversement, on la payait au constructeur par une série d'annuités. Elles se confondent d'ailleurs pour une machine prise en location.

Il est logique de répartir à peu près régulièrement, entre les diverses périodes de marche des machines, ces dépenses initiales, ou rarement renouvelées, comme on répartit les dépenses d'exploitation : c'est ce qu'effectuent plus ou moins bien les diverses combinaisons d'amortissement.

Indépendamment de toute opération comptable, une machine, au moment où elle vient d'être installée, a une certaine valeur. Au bout d'un certain temps, après une année par exemple, la valeur en est habituellement moindre ; on a consommé, pendant l'année, une partie de la valeur de la machine, comme on a consommé le charbon et le travail des chauffeurs. Que cette diminution de valeur figure ou non dans les comptes, elle ne s'en produit pas moins. Il en sera de même pendant les années suivantes.

La diminution continuelle de la valeur des machines tient à trois causes principales : d'abord à l'usure, qui résulte du travail, mais qui se produit même pendant les

chômages (surtout pour les chaudières) ; ensuite aux perfectionnements de la construction, qui livre des types de machines meilleurs ou de fabrication moins coûteuse ; enfin à la variation des services qu'on leur demande, d'où résulte fréquemment l'insuffisance des machines anciennes.

Cette réduction de la valeur des appareils, par suite de l'usure et de la dépréciation, pour être moins apparente pendant une courte période, ou plutôt moins observée, que la consommation directe de main-d'œuvre, de combustibles, d'huile, n'en est pas moins réelle et inévitable. Une machine installée dans une usine est une partie du capital fixe de cette usine, partie dont la valeur diminue peu à peu, et finit par disparaître entièrement, lorsque la machine ne constitue plus qu'un amas de ferraille.

Ces considérations montrent qu'on doit affecter chaque année une certaine somme à l'amortissement des machines, somme qui correspond à peu près à leur dépréciation réelle, et qui s'ajoute aux dépenses directes d'exploitation. En outre, on doit tenir compte de l'intérêt du prix de l'installation, qui peut avoir été faite au moyen d'un emprunt. Si cet emprunt est remboursable en une période qui correspond à la durée de la machine, on voit qu'en réalité elle aura été payée par une série d'annuités pendant la durée de son fonctionnement.

Les dépenses d'amortissement et d'intérêt élèvent le prix du cheval-heure d'autant plus que la machine aura fonctionné dans l'année pendant un moindre nombre d'heures.

TABLE ALPHABÉTIQUE

G

H

I

J

K

L

Q

R

S

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY